



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus-ja maaehitusinstituut
Maaehituse ja veemajanduse õppetool

Triinu Olm

**TASAPINNALISTE PUITKARKASSELEMENTIDEGA
SOOJUSTATUD KORTERMAJADE
EHITUSFÜÜSIKALISTE PARAMEETRITE UURIMINE**

**INVESTIGATION OF BUILDING PHYSICS PARAMETERS OF
TIMBER FRAME WALL ELEMENTS IN MULTISTOREY
BUILDINGS**

Ehitusinseneriõppe lõputöö
Maaehituse õppekava

Juhendaja: Marko Teder, *PhD*

Tartu 2018

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Triinu Olm		Õppekava: Maaehitus (382)	
Pealkiri: Tasapinnaliste puitkarkasselementidega soojustatud kortermajade ehitusfüüsikaliste parameetrite uurimine			
Lehekülgi: 78	Jooniseid: 54	Tabeleid: 10	Lisasid: 10
Osakond / Õppetool: Maaehituse ja veemajanduse õppetool			
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: Tsiviilehitus, T220			
Juhendaja(d): Marko Teder, <i>PhD</i>			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2018			
<p>Magistritöö eesmärgiks oli uurida ja hinnata puitkarkasselementidega soojustatud kortermajade ehitusfüüsikalisi tunnuseid – sooja- õhu- ja mürapidavust. Uuritavateks objektideks olid kaks kortermaja aadressidega Ladva 1 ja Ladva 3, Tartu.</p> <p>Lõputöö käigus termografeeriti mõlemad hooned nii seest kui väljast. Termografeerimise tulemusi võrreldi temperatuurivälja tarkvara <i>THERM</i> tulemustega, kus modelleeriti nende kortermajade sokli-ja vahelaesõlmed. Lisaks teostati kortermajas Ladva 1 müramõõtmised. Piirete õhupidavuse määramiseks sooritati ala-ja ülerõhutestid, mis teostati mõlema maja kahes korteris.</p> <p>Termografeerimise tulemused näitasid, et hoonetes ei ole hallituse ega kondensaadi tekkimise ohtu. Temperatuuriväljade modelleerimiste ja termografeerimiste tulemuste võrdlus näitas, et seinapaneelide paigaldus on teostatud korrektselt ning külmasildasid ei esinenud. Ladva 1 korterite nr 13 ja nr 17 vaheliseks õhumüra isolatsiooniindeksiks saadi mõõtmisel 57 dB, mis oli suurem kehtestatud normi minimaalsest väärtusest. Löögimüra isolatsiooniindeks samade korterite vahel oli 49 dB, mis on samuti normide piires. Rõhutestide katsetulemused näitasid, et hoone piirdetarindid olid õhupidavad ja olulisi lekkeid ei esinenud seinapaneelide omavahelistes ega ka elementide ja kivi- või betoonpinna ühenduskohtades.</p>			
Märksõnad: Alarõhutest, ülerõhutest, tarkvara <i>THERM</i> , mürapidavus			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Triinu Olm		Curriculum: Rural Building (382)	
Title: Investigation of Building Physics Parameters of Timber Frame Wall Elements in Multistorey Buildings			
Pages: 78	Figures: 54	Tables: 10	Appendixes: 10
Department / Chair: Department of Rural Building			
Field of research and (CERCS) code: Civil Engineering, T220			
Supervisors: Marko Teder, <i>PhD</i>			
Place and date: Tartu, 2018			
<p>The aim of Master's theses is to evaluate building physics parameters such as heat resistance, noise and air tightness on pre-fabricated timber elements using them to insulate multistory buildings. The research objects was two 2-stories buildings in Tartu- Ladva 3 and Ladva 1.</p> <p>First both buildings were internally and externally thermographed. The results of thermography were compared with the results of <i>THERM</i> software, where were modelled socket and ceiling details. Ladva 1 in apartment 13 were tested sound measurements. To evaluate air thigness, in Ladva 1 and Ladva 3 were taken positive and negative pressure test. Test was carried out in two apartments of both buildings.</p> <p>Results of thermography showed that in both buildings there were no risk of mold growth and condensation. Comparing <i>THERM</i> software and thermography pictures the results showed that wall panels were installed correctly and there were no big thermal bridges. The sound measurements results in Ladva 1 between apartments 13 and 17 was 57 dB, which was higher than the minimum value of standard. In same apartments the sound impact measurement results was 49 dB, which also was on limits. The <i>BlowerDoor</i> test revealed that the buildings wall panels were airtight and no significant leaking was observed between the elements and the concrete connection details.</p>			
Märksõnad: <i>BlowerDoor</i> test, <i>THERM</i> , sound measurement			

SISUKORD

SISUKORD	4
SISSEJUHATUS	6
1 ÜLEVAADE KIRJANDUSEST	8
1.1 Puitkarkasselement hoone.....	8
1.2 Külmasillad	12
1.2.1 Külmasildade kriitiline tase	13
1.2.2 Termograafilised mõõtmised	14
1.2.3 Külmasildade modelleerimine temperatuurivälja tarkvaraga <i>THERM</i>	15
1.3 Akustika	16
1.3.1 Hoone müra mõõtmine	17
1.4 Õhupidavus	17
2 UURIMISMATERJAL JA METOODIKA.....	21
2.1 Uuritavate objektide kirjeldus	21
2.1.1 Hoone tehnilised andmed	22
2.1.2 Seinapaneelide tüübid ning nende projekteerimine.....	22
2.1.3 Seinapaneelide tootmine ja transport.....	30
2.1.4 Puitkarkasselementide paigaldus	31
2.2 Termografeerimine	33
2.3 Temperatuurivälja tarkvara <i>THERM</i> kasutamine	34
2.4 Mürapidavuse mõõdistamine	34
2.5 Piirete õhupidavus.....	36
3 TULEMUSED JA ARUTELU	39
3.1 Termograafia mõõdistuse tulemused	39
3.1.1 Väline termografeerimine.....	39
3.1.2 Sisemine termografeerimine.....	42
3.2 Temperatuurivälja tarkvara <i>THERM</i> tulemused	49
3.3 Müra mõõdistamise tulemused	52
3.4 Piirete õhupidavuskatse tulemused	53
KOKKUVÕTE	58
KASUTATUD KIRJANDUS	60

LISAD	64
Lisa 1. Ladva 1 esimese korruse põhiplaan koos märkustega.....	65
Lisa 2. Ladva 1 teise korruse põhiplaan koos märkustega	66
Lisa 3. Ladva 3 esimese korruse põhiplaan koos märkustega.....	67
Lisa 4. Ladva 3 teise korruse põhiplaan koos märkustega	68
Lisa 5. Ladva 1 kortermaja vaated.....	69
Lisa 6. Ladva 3 kortermaja vaated.....	71
Lisa 7. Ladva 3 elementide jaotusplaan.....	73
Lisa 8. Ladva 1 kortermaja lõiked	74
Lisa 9. Ladva 3 kortermaja lõiked	76
Lisa 10. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta	78

SISSEJUHATUS

Eestis on ehitatud läbi sajandite erinevaid puitkonstruktsioonil põhinevaid hooneid. Tänapäeval pööratakse üha rohkem tähelepanu hoone ostmisel selle valmimisprotsessile ning kuidas hoone ehitus mõjutab keskkonda. Tööstuse arenedes on puitkarkassmajade tootmisest kujunenud eraldi tööstusharu, kus tegutseb Eestis ligi 140 ettevõtet. (Puitmajaklaster 2009a)

Puitkarkasselementide tootmise protsess on tavapärasest karkasskonstruktsioonist kaugemale arendatud (Staib et al. 2008). See võimaldab toota hoonetele parema kvaliteediga puitkarkasspaneeli (Green et al. 2017:52). Elementide tootmine toimub kontrollitud keskkonnas, mis võimaldab hinnata tootmisprotsesse (*Ibid.*). Lisaks on tootmiskeskond turvalisem ja elemendid valmivad kuivas keskkonnas, eemal ebasoodsatest ilmastikutingimustest (*Ibid.*).

Puitkarkasselementidest maja ehitamine või renoveerimine kasutades puitkarkasselemente on Eestis muutunud väga populaarseks. Seda näitab elementmajade arvukus ning samuti suuremad pilootprojektid, mis saavad tähelepanu üle Eesti nagu näiteks Tallinnas TTÜ ühiselamu renoveerimine puitkarkasselementidega. (Nõges 2017)

Lõputöö eesmärgiks oli uurida puitkarkasselementidega soojustatud kortermajades kolme ehitusfüüsikalist parameetrit – sooja-, müra- ja õhupidavust. Varasemalt pole Eestis seinapaneelidega soojustatud hoonete puhul vastavaid ehitusfüüsikalisi suurusi uuritud. Töös selgitatakse välja, kas kõik eelpool nimetatud kolm ehitusfüüsikalist tunnust on vastavuses kõigi kehtivate seaduste, määruste ja normidega. Uuritavateks objektideks olid Tartus Ladva tänaval asuvad kortermajad nr 1 ja nr 3. Korterite vahelised kandvad seinad on ehitatud Columbia-kivi õõnesplokist ning vahelaed betoonpaneelidest. Hoone välisfassaad on soojustatud AS Welement'is projekteeritud ja toodetud puitkarkasselementidega.

Magistritöö oli jaotatud kolmeks osaks. Esimeses osas kirjeldati seinapaneelide tootmist ning analüüsitakse kirjandust, kus on hoonete renoveerimisel kasutatud puitkarkasselemente. Lisaks koostatakse erinevate teadusartiklite põhjal ülevaade külmasildade tekkest, kuidas on võimalik välja selgitada nende asukohad ning millist mõju need inimesele avaldavad.

Esimeses osas on välja toodud hoone õhupidavus ning samal teemal varasemalt teostatud uuringud. Kirjanduse analüüs on teostatud ka akustika kohta ja kirjeldatakse kuidas peaks toimuma müra mõõdistamine vastavalt standardile.

Teises peatükis tutvustatakse täpsemalt uuritavaid objekte. Hoonete kohta tuuakse välja peamised tehnilised andmed. Kirjeldamist alustatakse hoone projekteerimise etappidega ning lõpetatakse montaažiga objektil. Teises peatükis seletatakse lahti termografeerimise, mürapidavuse ja hoone piirete õhulekete mõõtmiskatsete metoodika. Tuuakse välja kõigi kolme katse teostamise asukoht ning olulised aspektid, mida katse juures tuli kõige enam jälgida.

Kolmandas ehk analüüsivas peatükis esitati katsete tulemused ja järeldused ning uuriti kas kõik parameetrid vastasid kõigile nõuetele ja määrustele. Termografeerimise kohta teostati põhjalik analüüs ning toodi välja, kas elementide paigaldus objektil oli korrektne. Müramõõtmise aruande põhjal oli võimalik järeldada, kas hoone vastab Eestis kehtivatele müra nõuetele ja määrustele. *BlowerDoor*´i katse alusel anti hinnang hoone õhupidavusele.

Uuringusse valitud kortermajade kõik katsemõõtmised kooskõlastati ehitusfirmaga Rand&Tuulberg ning puitkarkasselementide tootjaga AS Welement.

Autor tänab AS Welement´i kollektiivi, kes aitas jõuda lõputöö ideeni, ehitusfirmat Rand&Tuulberg, kes pakkus abi mõõtmistöödel, ning Akukon Oy Eesti filiaali, kes teostas mürapidavus mõõdistustööd. Samuti tänab autor Eesti Maaülikooli õppejõudu Martti-Jaan Miljanit, kes aitas teostada piirete õhupidavuskatsed, ja lõputöö juhendajat Marko Tederit.

1 ÜLEVAADE KIRJANDUSEST

Eestis on ehitatud läbi sajandite erinevaid puitkonstruktsioonil põhinevaid hooneid. Tööstuse arenedes on puitmajade tootmine kujunenud eraldi tööstusharuks, kus tegutseb ligi 140 ettevõtet (Puitmajaklaster 2009a). Puitkarkasskonstruktsiooniga elementide tootmismahd 2014 aastal oli 11% kasvanud võrreldes varasema aastaga (Statistikaamet 2016).

1.1 Puitkarkasselement hoone

Pre-fabricated element on hoone või hoone osa, mis valmistatakse mujal kui selle lõplik asukoht. Samuti saab sellist tegevust nimetata *off-site* ehitus või *off-site* tootmine. (PrefabAUS 2018)

Tehases toodetud elementide eelisteks on (Puitmajaklaster 2009b):

- korrektne ning süsteemne tootmisprotsess;
- tootmine toimub kuivades tingimustes ja järelevalve all;
- kiire ning efektiivne montaaž, mis minimaliseerib ilmastikust tingitud kahjustused;
- töid teostavad oma ala spetsialistid, kellel on pikaajaline kogemus;
- hoone montaažiks koostatakse korralik projektdokumentatsioon, mis väldib ebakõlasid hoone paigaldamisel.

Puitelemendi tootmise puhul on kõige olulisemaks materjali valik konstruktsiooni. Konstruktsiooni puhul on oluliseks on kaks parameetrit- materjali niiskussisaldus ning struktuuriline eripära ehk materjali mõõdud. Arvestades neid kahte aspekti on võimalik toota stabiilne ning tugev puitkarkasselement. (Green et al. 2017: 25)

Puitkarkasselementide tootmine toimub tehases, kus toimingud käivad protsessi järgi. Selle tulemusena on väiksem oht vigade tekkeks seinapaneelide tootmisel (Green et al. 2017: 53).

Töötamine tehases on ohutum ning töötajatele tagatakse head tingimused elementide valmistamiseks. Suureks eeliseks on, et elemendi valmimine toimub kinnistes ruumides ehk ilmastiku mõju elemendi tootmisel on null. (Green et al. 2017: 53)

Elementide tootmine toimub tavaliselt liini peal. See annab võimaluse planeerida aega täpselt, millal element valmis saab ning platsile toimetatakse (Green et al. 2017: 53). Sellise info teadmine aitab planeerida aja kulu ühe hoone valmimisele ning saab kindlaks määrata päeva, millal elemendid tehast objektile saadetakse ning paigaldatakse.

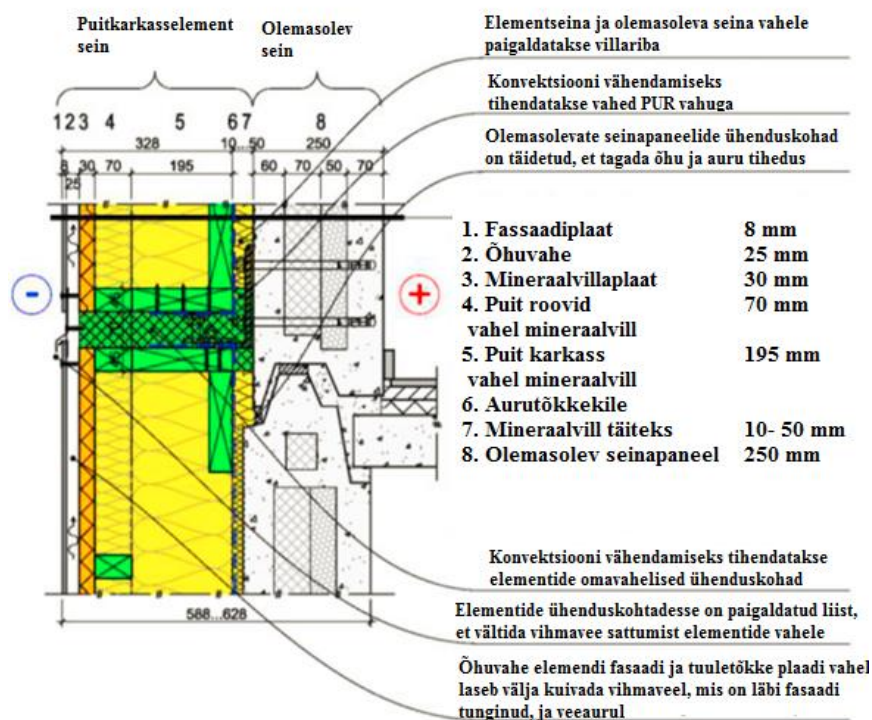
Puitkarkasselementide tootmine on väga kõrgelt arenenud ning võimaldab isegi fassaadi lahendusega jätta kivimaja mulje. Selleks saab kasutada erinevaid krohvimissüsteeme või mõnd konkreetset fassaadikivi või plaadi lahendust. (Sniker 2018)

Tänapäeval on tekkimas huvi puitkarkasselemendi vastu nii uue hoone rajamisel kui ka renoveerimisel. Uuringutes on välja selgitatud, et Euroopas on ligi 70% kortermajade eluiga on 30 aastat ja ligi 35% hoonetest on eluaega üle 50 aasta. (Balaras et al. 2004)

Vanade hoonete välisfassaadi renoveerimisel on võimalik vähendada talvel energiakulu sooja tootmisele ning suvel jahutamisele. Fassaadi renoveerimine aitab parandada hoone õhupidavust, mille tulemusena väheneb kontrollimatu õhu liikumine läbi konstruktsioonide. (Sandberga et al. 2016)

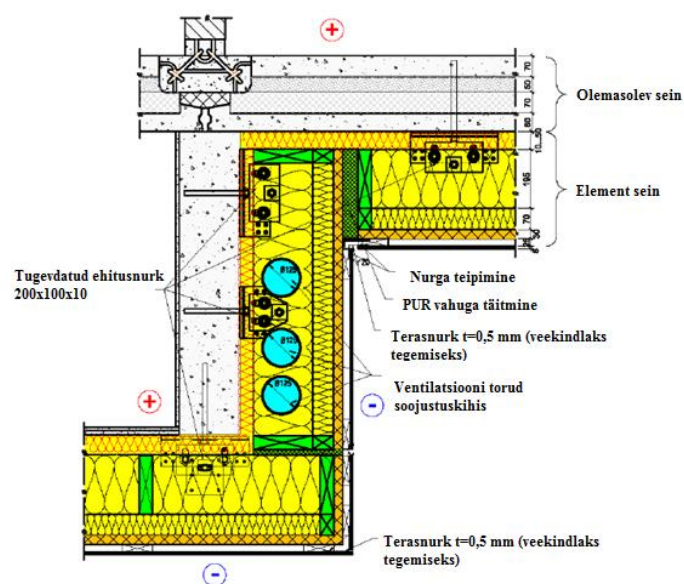
Eestis renoveeriti 2017 aastal puitkarkasselementidega kortermaja Tallinnas. Renoveeriti Tallinna Tehnikaülikooli pereühiselamu, mis ehitati aastal 1986. Hoone seinad ning katus soojustati tehases eelvalmistatud moodulpaneelidega. (Nõges 2017)

Akadeemia tee 5a ühiselamu välissein oli betoonpaneel- 60 mm välisküljes betoonkiht, 70 mm soojustust, 50 mm vahtpolüstürool ning 70 mm sisemine betoonplaat. Hoone soojustamiseks kasutati *pre-fabricated* elemente, mille karkassi laius oli 195 mm. Elemendi sisekülge paigaldati tihendusvillariba, mis läks olemasoleva seina vastu. Väliskihtidesse lisati vertikaalne roov 70 mm, mineraalvillaplaat sobiva tuuletõkkekaitsega 30 mm ning õhuvahe ja fassaadiplaat 8 mm. (Pihelo et al. 2017) Joonisel 1 on näidatud elemendikihid.



Joonis 1. Akadeemia tee 5a seinaelemendi lõige (Autor: Pihelo et al. 2017).

Elementide paigalduse puhul oli kõige keerulisemaks kohtaks ventilatsioonitorude ühendamine. Seinaelemendi oli tehases paigaldatud ventilatsioonitorud, mis tuli omavahel paigalduse käigus kokku panna ja tagada õhutihe ühendus. (Pihelo et al. 2017) Joonisel 2 on näha nurgasõlm, kus elemendi sisse on tehases paigaldatud ventilatsiooni torud.



Joonis 2. Akadeemia tee 5a kortermaja nurgäihenduse lõige (Autor: Pihelo et al. 2017).

Puitkonstruktsioonelementide paigalduse juures tuli tähelepanu pöörata niiskuse väljakuivamise perioodile. Tagamaks, et paneelist niiskus välja kuivaks, tuli kasutada vastavaid aurutõkke ning tuuletõkkemembraane. Akadeemia tee 5a hoone puhul kõige keerulisemaks oli välja selgitada õige aurutõkketule, kuna elemendid paigaldati olemasolevale betoonpinnale ning kui niiskus ei kuiva välja võib tekkida hallitus. Tagada tuli, et ehitusjärgne niiskus saaks seinast välja kuivada ning selleks valiti aurutõkketule, mis tagas auru läbilaskvuse igas olukorras. (Pihelo et al. 2017)

2014. aastal alustati projektiga *Tes EnergyFacade*, millest võtsid osa põhjamaad- Rootsi ja Soome. Projekti eesmärgiks oli arendada ning välja töötada puitkonstruktsioon elementide kontseptsioon, mida kasutada hoonete renoveerimiseks. Võrreldi omavahel uusi fassaadi elemente ning traditsioonilist välisseina soojustamise viisi. Vaatluse alla võeti üks Rootsi kortermaja ning üks Soomes asuv kortermaja. Sooviti välja selgitada, kas elementidega soojustamine on kiirem ning kas sellisel viisil on võimalik korteriomaniike elutegevust vähem häirida. (Sandberga et al. 2016) Joonisel 3 on välja toodud uuritavad hooned.



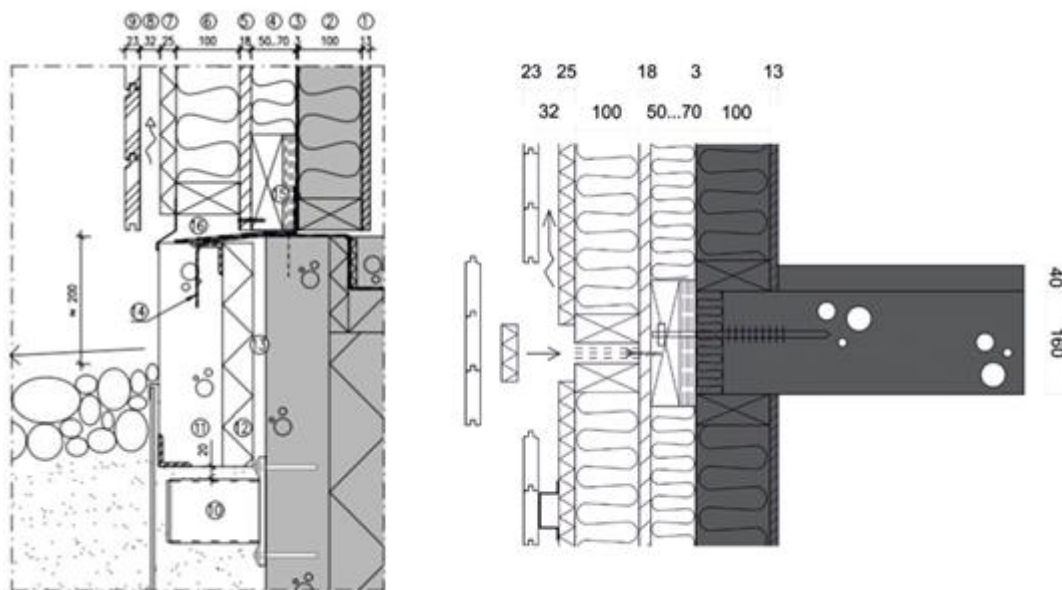
Joonis 3. Uuritavad objektid Rootsis Skellefteå(vasakul) ja Soomes Grindstugan(paremal) (Autor: Sandberga et al. 2016).

Rootsis Skellefteå linnas asuv ühiskondlik hoone renoveeriti kohapeal ehk kõik tööd teostati platsil. Välisseinale lisati järgmised kihid (Sandberga et al. 2016):

- 50 mm soojustust;
- 28x70 mm roovid (samm 600 mm);
- 22x120 mm soontega fassaadi plaat;
- 23x45/23x95 mm vertikaalne laudis.

Skellefteå asuv hoone renoveeriti järkjärgult, mille tulemusena pikk ehitusaeg häiris elutegevust hoonetes (Sandberga et al. 2016).

Soomes Jyväskylä linnas asuv kortermaja sooviti renoveerida puitkarkasselementidega. Hoone kohta teostati tehnilise seisukorra hinnang, peeti läbirääkimised kohaliku elementide tootjaga ning renoveerimist alustati 2017 aastal. Välja töötati kaks varianti, kuidas puitelementidega hoonet soojustada. Joonisel 4 on kujutatud elementide ühendusliide ja sokli lahendus, mille projekteerijad välja töötasid. (Sandberga et al. 2016)



Joonis 4. Soklisõlme ja elementide ühenduskoha lõige Soomes Grindstugan hoonel
(Autor: Sandberga et al. 2016).

Jooniselt 4 on näha, et olemasolev sein on märgitud halli värvusega ning element, millega hoone soojustatakse on valge värvusega. Elementide konstruktiivne lahendus on nii Soomes kui ka Eestis sarnase põhimõttega, kuid materjalid on erinevate mõõtmetega, mis tingitud projekteerimisest.

1.2 Külmasillad

Külmasildadeks nimetatakse hoone tarindi osi, mille soojusjuhtivus on teistest tarindi osadest suurem. Külmasildasid eristatakse järgnevalt (Masso 2012):

- geomeetrilised külmasillad;
- konstruktsioonilised külmasillad.

Geomeetrilisteks külmasildadeks loetakse välisseina nurka, põranda ja välisseina liitumist, katuslae ja välisseina liitumist (Kalamees et al. 2012).

Ehitustehnilised ehk konstruktsioonilised külmasillad esinevad välisvoodri sidemetes ning erinevates läbiviikudes, mis on teostatud läbi tarindi (Kalamees et al. 2012).

Eraldi tuleb vaadelda kohti, kus võivad esineda lisasoojakaod, milleks on (Kalamees et al. 2012):

- joonkülmasillad;
- punktkülmasillad.

Külmasildasid soovitakse vältida mitmel põhjusel (EKVÜ 1997):

- külmasilla suuremast soojusläbivusest tingitud madalam sisepinna temperatuur ja sellest tulenev kõrgem suhteline niiskus võib põhjustada tarindis või tarindi sisepinnal mikroorganismide ehk hallituse kasvu. Hallituse kasvuks sobiv suhteline niiskus jääb vahemikku 75..80%;
- madalate pinnatemperatuuride erinevus suurtel pindadel mõjutavad soojuslikku mugavust eelkõige tulenevalt ebasümmeetrilisest kiirgusest ja õhuliikumisest;
- külmasildade tõttu suureneb hoone energiakulu.

Eestis võetakse arvutustesse külmasillad arvesse lineaarse soojusläbivusega. Arvutamisel võetakse aluseks hoone projektdokumentatsioon ning energiaarvustused. Soovitatav oleks lähtuda standarditest nagu ISO 10211, EN ISO 10077, EN ISO 14683, ISO 15099. (Kuusk et al. 2017)

1.2.1 Külmasildade kriitiline tase

Külmasildade kriitilise taseme määrab temperatuuriindeks f_{Rsi} , mis on suhe sisepinnatemperatuuri, välistemperatuuri ja sisetemperatuuri vahel (EKVÜ 1997).

Temperatuuriindeks f_{Rsi} arvutatakse järgmise valemiga (Alev et al. 2012):

$$f_{Rsi} = \frac{t_{si} - t_e}{t_i - t_e} = \frac{R_T - R_{si}}{R_T}, \quad (1.1)$$

kus

f_{Rsi} temperatuuriindeks -;

t_{si} sisepinnatemperatuur °C;

t_i sisetemperatuur °C;

t_e välistemperatuur °C;

R_T piirdetarindi kogusoojustakistus m²·K/W;

R_{si} piirdetarindi sisepinna soojustakistus m²·K/W.

Tänapäevaste elamute projekteerimisel võib temperatuuriindeksi piirsuuruseks arvestada $f_{Rsi} \geq 0,8$ (Alev et al. 2012).

1.2.2 Termograafilised mõõtmised

Termogafeerimine on mittepurustav uuringu viis, mida kasutatakse ehituskvaliteedi ülevaatuseks (Krüger 2011). Külmasild tekib hoonesse, kui külm välisõhk siirdub hoonesse läbi õhulekkekohtade ning jahutab sisepinnatemperatuuri maha (Alev et al. 2012). Termografeerimise kvaliteedi annavad korralik ning kalibreeritud mõõteriist, termopiltide korrektne tõlgendus ja kogenud mõõtja (Kalamees et al. 2011).

Termografeerimise peamised eesmärgid on (Kalamees et al. 2011):

- hinnata külmasildade kriitilisust;
- hinnata, kui suurel määral erineb hoone piirete soojusjuhtivus;
- määrata pinnatemperatuuride erinevused, mis viitab soojuskiirguse ning niiskussisalduse ebahühtlusele;
- leida õhulekete kohti;
- hinnata ehituskvaliteeti;
- tuvastada sein ja põrandasiseseid torusid ja elektrisüsteeme.

Kaamera abil saab mõõta hetkelist pinnatemperatuuri, mida hiljem kasutatakse arvutusliku temperatuuriindeksi hindamisel (Kalamees et al. 2011).

Temperatuuriindeksite piirsuurused hallituse kasvuks ja veeauru kondenseerumiseks on välja arvatud vastavalt niiskuskooormusele (Kalamees 2006b). Tabel 1 annab ülevaate temperatuuriindeksi väärtustest.

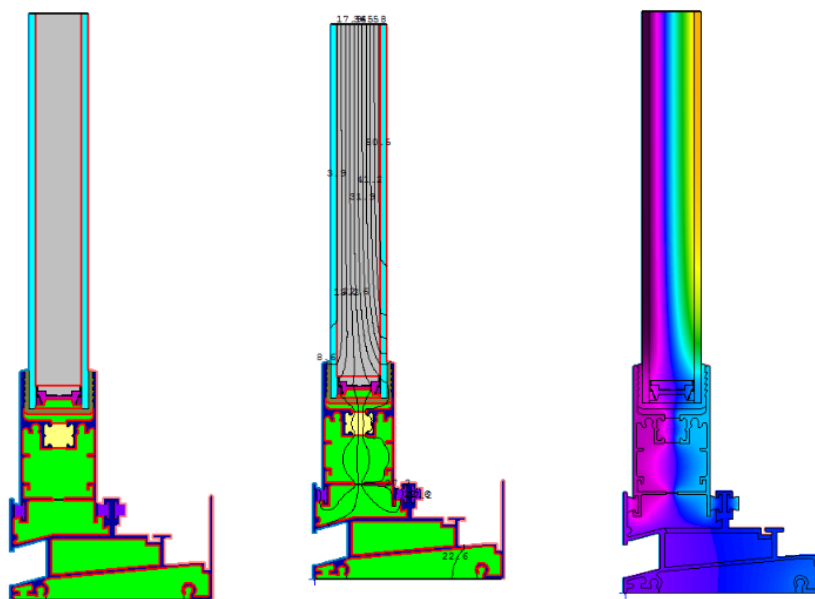
Tabel 1. Temperatuuriindeksi väärtused f_{Rsi} (Kalamees 2006b)

Niiskuskooormus		f_{Rsi} piirväärtus	
		Kondenseerumise vältimine	Hallituse tekke vältimine
Niiskuslisa	Suvel +2,5 g/m ³	≥0,8	≥0,7
	Talvel +6 g/m ³		
Niiskuslisa	Suvel +1,5 g/m ³	≥0,65	≥0,55
	Talvel +4 g/m ³		

1.2.3 Külmasildade modelleerimine temperatuurivälja tarkvaraga *THERM*

THERM on kahemõõtmeline soojusjuhtivuse analüüsi tarkvara, mis võimaldab modelleerida keerukaid ehitustarindeid (THERM 2018).

Kasutades programmi *THERM* on võimalik modelleerida soojuse liikumine erinevates hoone osades nagu näiteks aknasõlmes, seintes, vundamendi sõlmes ning kõigis muudes konstruktsiooni osades, kus külmasillad probleemiks (THERM 2018). Joonisel 5 on näide, kuidas annab programm tulemused, mida hilisemalt on võimalik analüüsida ning hinnata.



Joonis 5. *THERM* programmi modelleerimis võimalused aknasõlmes (Autor: THERM 2018).

1.3 Akustika

Ehitusakustika on heli ülekandumine ühest ruumist teise tarindite vahendusel. Erinevate meetmetega vähendatakse ning tõkestatakse helide ülekandumist ruumist ruumi selliselt, et võimaldada ruumis soodsates oludes töötada, magada ning puhata. (Soome Ehitusinseneride Liit RIL ry 2009)

Heli levib kahel viisil (Masso et al. 2010):

- õhu kaudu (õhumüra);
- tarindite kaudu (löögimüra).

Õhumüra tõkestavad nii seinad kui vahelaed, samuti aknad ning ukсед. Müra levik tuleb takistada ka erinevate torude ja torukanalite kaudu. Õhumüraks võib lugeda näiteks kõnet ja muusikat. (Masso 2012)

Vahelaed tõkestavad löögimüra. Vahelaes on eriti oluline sammumüra levik, mis liigub alumisel korrusel olevatesse ruumidesse läbi põranda (Masso et al. 2010). Löögimüraks saab lugeda ka muudest mehaanilistest mõjudest tekitatud müra nagu näiteks erinevate kodumasinate tööst tulenev müra (Masso 2012).

Nõuded mürapidavusele on kehtestatud standardiga EVS 842: 2003 Ehitiste heliisolatsiooninõuded, mille andmed on välja toodud Tabel 2 (Masso et al. 2010).

Tabel 2. Sisepiirete nõutav mürapidavus (EVS 842:2003)

Nr	Hoone ja ruum	Nõutav mürapidavus dB	
		Min. õhumürapidavus R_w'	Max. löögimürajuhtivus $L_{n,w}'$
Elamud			
1	Korteri eluruumide vahel	55	
2	Korteri eluruumide ja üldkasutatavate ning bürooruumide vahel	55	
3	Korteri ja müratekitava ruumi(teenindus,- töö- ja puhkeruumid, garaažid) vahel	60(65)	
4	Ühe korteri ruumide vahel	43	
5	Korteriuks trepikotta Korteriuks trepikojast eraldatud koridori	32(35) 27	
6	Korteri elutubadest teise korterisse		53
7	Rõdult, trepilt, koridorist, vannitoast ja WC-sr teise korterisse		58
8	Müratekitavast teeninud,- töö- või puhkeruumist või garaažist korterisse		48
9	Kahekorruselise korteri eluruumide vahel		63

Standardiga on määratletud nõutav õhumürapidavus R'_w ja löögimürajuhtivus $L'_{n,w}$. Õhumürapidavus näitab, kui palju tarind tõkestab heli. Mida suurem antud väärtus on, seda mürapidavam on tarind. Löögmürajuhtivus näitab, kui tugev on tarindit läbinud heli tase kõrval või all olevas korteris. Löögmürajuhtivuse väärtus peab olema võimalikult väike, see tagab mürapidavuse tarindis. (Masso et al. 2010)

1.3.1 Hoone müra mõõtmine

Eesti Vabariigi määrus „Müra normtasemed elu- ja puhkealal, elamutes ning ühiskasutusega hoonetes ja mürataseme mõõtmise meetodid“ alusel on määratletud müra mõõtmise ja hindamise meetodid. Järgnev ülevaade on refereering seadusest.

§10 kohaselt eeldatakse, et helirõhutaseme mõõtmiseks kasutatavad seadmed on vastavad standardite või samaväärsete dokumentidega. Seadmed peavad olema kalibreeritud akrediteeritud kalibreerimislabori poolt ning seda toimingut teostatakse igal aastal.

1.4 Õhupidavus

Õhupidavus väljendub kontrollimatus ning planeerimatus õhuvoolumis hoone erinevate piirete kaudu nagu näiteks praod või ebatihedused (Kalamees et al. 2011). Piirete õhupidavus mõjutab järgmisi tegureid (Kalamees et al. 2011):

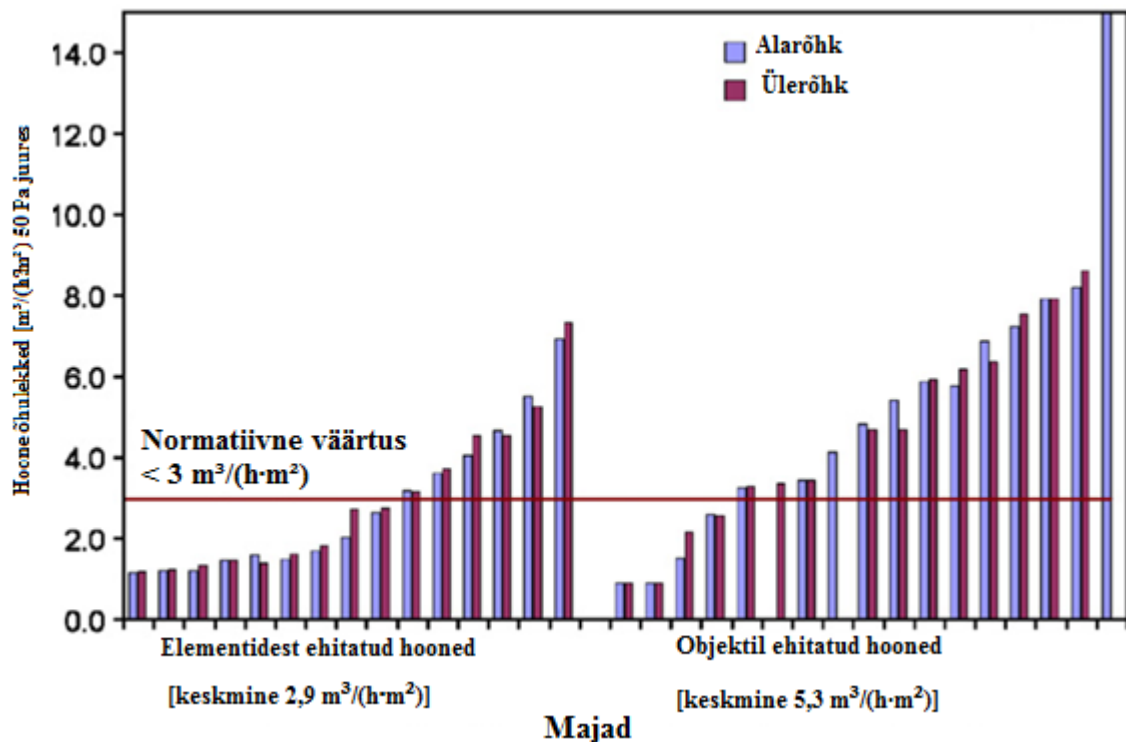
- hoonete energiatõhusust;
- niiskustehnilist probleemi, hallituse teket, veeauru kondenseerumist;
- sisekliima kvaliteeti;
- müraprobleeme;
- ventilatsioonisüsteemide toimivust.

Puitkarkasselement majade kohta oli Eestis teostatud uuring, kus vaatluse alla võeti 32 ühepereelamut, mille valmimisaeg jäi vahemikku 2003-2005 aastal ning uuriti õhupidavust ning õhulekkeid (Kalamees 2006a). Hoonepiirete õhupidavus mõõdeti vastavalt standardile

EVS-EN ISO 9972:2015 (Standardikeskus 2001). Uuringus kasutati *BlowerDoor* Mudel 4 seadmeid ning mõõtmisi teostati 0 kuni 60Pa-ni, kus amplituudiks oli 10Pa (Kalamees 2006a).

Katsete tulemusena toodi välja, et ühekorruselised hooned on paremini tihendatud ning esines väiksemaid õhulekkeid kui kahekorruselistel pereelamutel. Peamiseks põhjuseks toodi välja, miks kahekorruselised hooned olid suurema õhuläbilaskvusega, oli ühenduskoht vahelae ning välisseina vahel. (Kalamees 2006a)

Tulemustes toodi välja võrdlus elementidest seintega püstitatud hoone erinevus kohapeal ehitatud hoonega. Kokkuvõttes nii ühe- kui kahekorruseliste hoonete puhul olid elementidest ehitatud hooned õhupidavamad. (Kalamees 2006a) Joonisel 6 on näha graafikut, kus võrreldakse elementidest ehitatud hoonet kohapeal ehitatud hoonega.



Joonis 6. Element hoone ja objektil kohapeal ehitatud hoone õhupidavuse võrdlus (Autor: Kalamees 2006a).

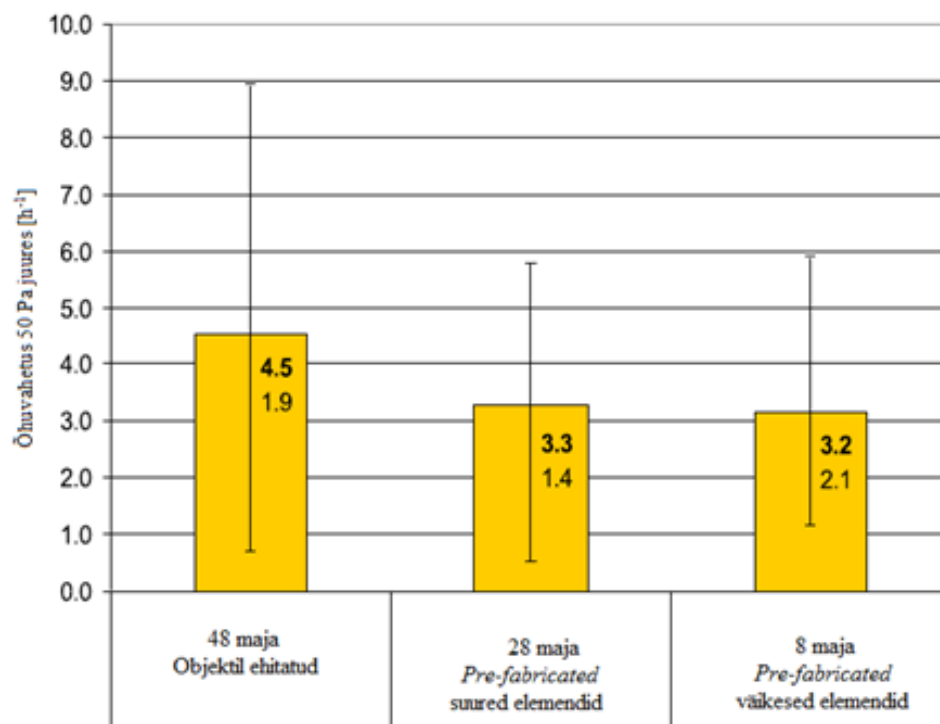
Sarnast uuringut on teostatud Soomes, kus uuriti 170 ühepereelamut ning 56 kortermaja ning teostati *BlowerDoor* seadmega rõhukatse (Vinha et al. 2015).

Mõõtmisi teostati erineva konstruktsiooniga hoonetele, milleks olid (Vinha et al. 2015):

- AAC sein ehk autoklaavitud ehitusblokk sein;
- LWA W sein ehk kergbetoonsein;
- tellissein;
- betoonblokk sein;
- betoonelement sein;
- puitkarkassein;
- palksein.

Uuringusse võetud puitkarkassmajad olid kõik erinevad näiteks vanuse, ventilatsiooni tüübi ja konstruktiivse lahenduse poolest (Vinha et al. 2015).

Katse käigus selgus, et ühepereelamutes, mis olid ehitatud objektil, oli keskmine õhuvahetuse tegur $4,5 \text{ h}^{-1}$. Selle väärtuse tulemuseks katsetati 20 maja. Elementidest ehitatud hooneid oli katsetamiseks 36, kus 28 olid suurtest elementidest ehitatud hooned ning 8 väikestest elementidest kokku pandud hooned. Nende majade õhupidavus oli parem-õhuvahetuse väärtus 50 Pa juures oli keskmiselt $3,25 \text{ h}^{-1}$. (Vinha et al. 2015) Joonisel 7 on välja toodud puitkarkasshoonete õhuvahetuse näitajad.



Joonis 7. Õhu vahetuse näitajad Soome puitkarkasselement majade puhul (Vinha et al. 2015).

2 UURIMISMATERJAL JA METOODIKA

2.1 Uuritavate objektide kirjeldus

Lõputöös uuritavateks objektideks oli kaks kortermaja, mis asuvad Tartus aadressil Ladva 1 ja Ladva 3 (Joonis 8). Hooneid hakati ehitama 2017 aasta aprillis. Mõlemas kortermajas oli 18 korterit, kus oli projekteeritud kahetoalised, kolmetoalised ning neljatoalised korterid (vt Lisa 1.- Lisa 6.). Hooned olid kahekorruselised ning ühe hoone suletud netopind oli 1359,7 m² (Ehitisregister 2017). Mõlemad korterelamud olid projekteeritud RTG Projektbüroo poolt ning arhitektiks oli Jelena Beljajeva.



Joonis 8. Ladva 1 ja Ladva 3 asukoht Tartu linnas (Autor: Maa-amet 2017).

2.1.1 Hoone tehnilised andmed

Hoone üldised tehnilised andmed Ladva 1 korterelamul on järgmised (Ehitisregister 2017):

- ehitusalune pind: 708 m²;
- maaapealsete korruste arv: 2;
- maa-aluste korruste arv: 1;
- absoluutne kõrgus: 53,3 m;
- kõrgus: 7,9 m;
- pikkus: 44,6 m;
- laius: 22,8 m;
- sügavus: 1,8 m;
- köetav pind: 1359,7 m²;
- üldkastatav pind: 318,4 m²;
- tehнопind: 28,5 m².

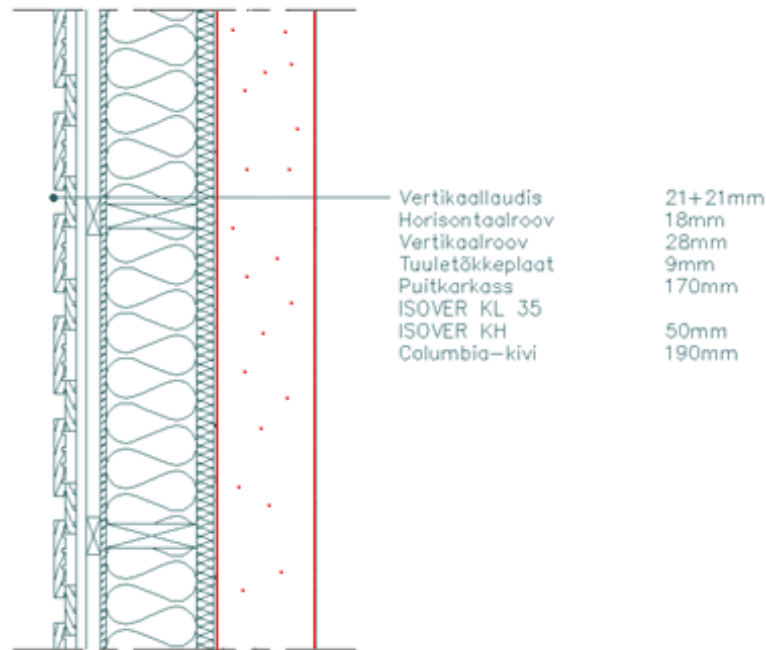
Järgnevalt on Ladva 3 korterelamu üldised tehnilised andmed üles loetud (Ehitisregister 2017):

- ehitusalune pind: 741 m²;
- maaapealsete korruste arv: 2;
- maa-aluste korruste arv: 1;
- absoluutne kõrgus: 54,3 m;
- kõrgus: 7,9 m;
- pikkus: 44,6 m;
- laius: 22,8 m;
- sügavus: 1,8 m;
- köetav pind: 1418,3 m²;
- üldkastatav pind: 318,4 m²;
- tehнопind: 28,5 m².

2.1.2 Seinapaneelide tüübid ning nende projekteerimine

Kortermajad Ladva1 ja Ladva 3 olid põhiplaanidelt sarnase projektiga ning seinapaneelide kirjeldus kehtib mõlema hoone puhul (vt Lisa 1- Lisa 9). Järgnevad alapeatükid keskenduvad hoone elementide projekteerimisele ja saadud informatsioon pärineb AS Welement'i projekteerijatelt.

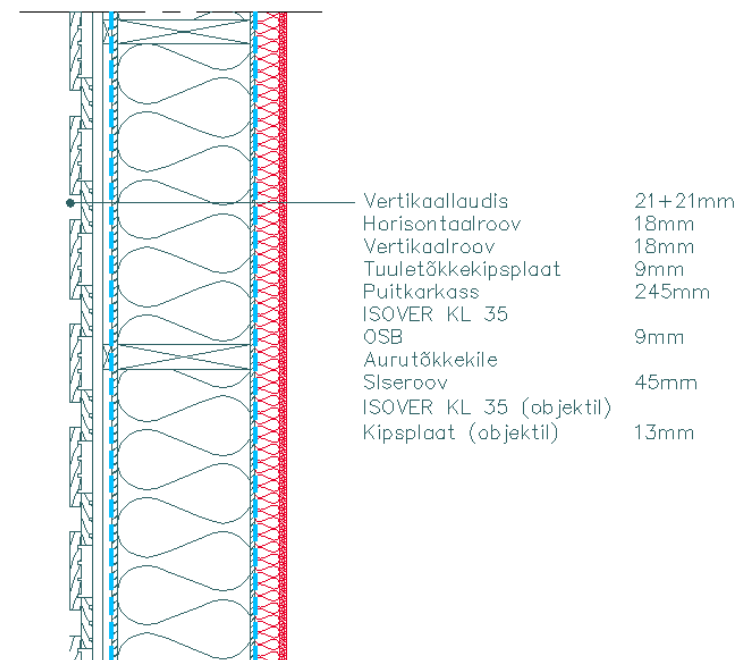
Hoonetele projekteeriti kaks erinevat puitkarkasspaneeli tüüpi. Esimene seinapaneeli tüüp paigaldatakse Columbia-kivi õõnesplokist laotud seinale. Joonis 9 on kujutatud välisseinaelemendi tüüp nr 1 lõiget.



Joonis 9. Välisseinaelemendi tüüplõige nr 1.

Joonistele märgiti erineva värviga, millised materjalid paigaldatakse tehases ning millised materjalid objektil. AS Welement'is oli projekteerijate vahel kooskõlastatud, et materjal, mis paigaldatakse tehases, on roheline/sinise värvusega ning materjal, mis tuleb objektil lisada, on punase värvusega. Joonisel 9 on näha, et välisseinapaneelis olid kõik kihid tehases paigaldatud.

Teiseks tüübiks oli seinapaneel, mille puitkarkass oli 245 mm (Joonis 10).



Joonis 10. Välisseinaelemendi tüüplõige nr 2.

Joonisel 10 toodud seinalõikes on näha, et seinapaneelis paigaldatakse sisemine vill (ISOVER KL35) ja kipsplaat objektile. Need materjalid tarniti kohapeale AS Welement'i poolt. Samuti nagu Joonisel 9 on ka Joonisel 10 kujutatud elementide ühenduskohad „lahtised“ ehk välisvoodrilauad tuli paigaldada ühenduskohtades objektile (Joonis 11).



Joonis 11. Ladva 3 hoone elementide "lahtised" ühenduskohad, millele paigaldatakse laudis objektile.

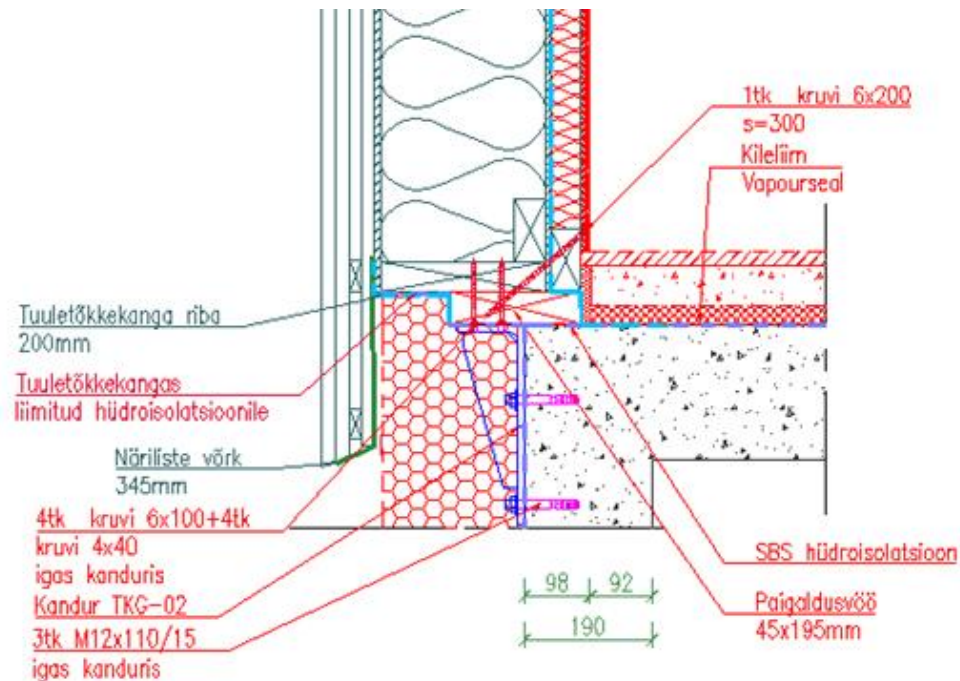
Joonisel 11 kujutatud hoone fassaadil on näha, et lisaks puitkarkasspaneelide ühenduskohtadele on avatud ka sokli osa, millele ehitaja paigaldas sokliplaadi. Elemente kahe maja peale kokku oli 118 tk ja keskmine puitkarkasspaneeli laius oli 3 m ning kõrgus 6,8 m.

Projekteerimise käigus modelleeriti hoone ning selleks kasutati *AutoCad Architecture* alaprogrammi *hsbcad*. *Hsbcad* on tarkvara, milles projekteeritakse 3D mudelis, *BIM* keskkonnas, ka *CAM* käsklused seadmetele. Protsessi käigus lahendati läbi elementide ühendused ning kinnitusmeetodid. Paigaldamiseks koostati tööjoonised, millele oli märgitud kõik vajalik informatsioon paigaldajale.

Olulisteks kohtadeks oli elementide omavahelised liitekohad, nurgäühendused betoonseinaga ja vahelaehendused. Nendes piirkondades oli kõige keerulisem tagada paigaldajal seinapaneelide korrektne ühendus.

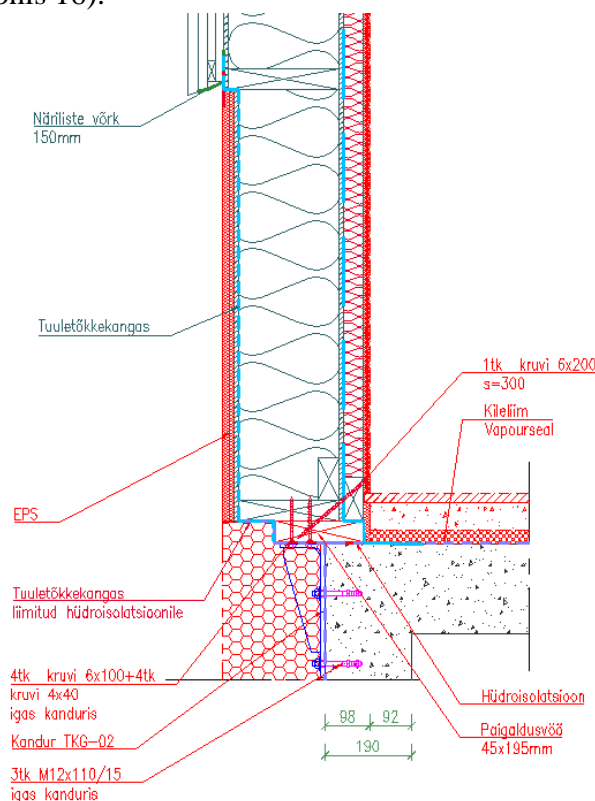


Sokkel oli maja esiküljel ja tagaküljel lahendatud erinevalt. Esiküljel oli element kaetud lõpuni laudisega ehk objektile ei pidanud lisa fassaadilaudu paigaldama. Joonisel 15 on kujutatud soklisõlm, kus element on kinnitatud betoonpinnale.



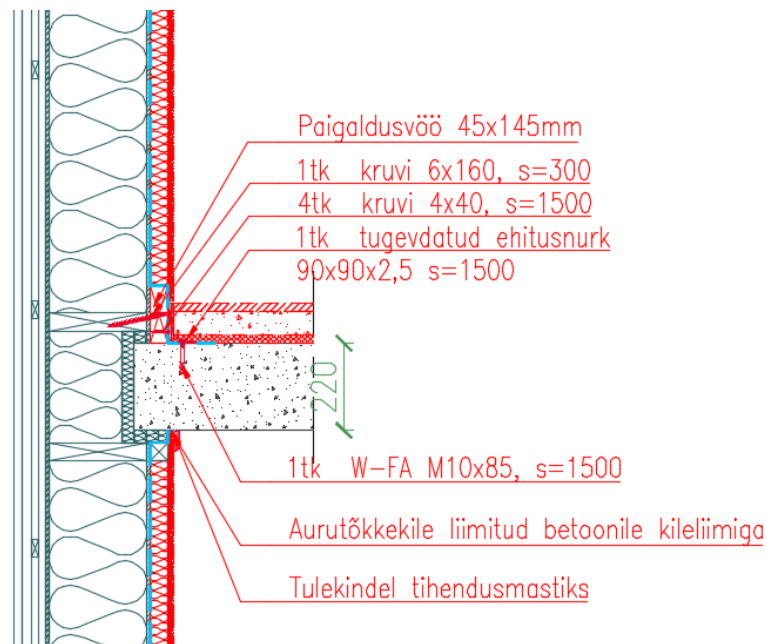
Joonis 15. Sokliühendus, kus element on kinnitatud betoonpinnale.

Hoone tagumisele küljele oli projekteeritud soklisõlme sokliplaat, mis hiljem ehitaja objektile elemendile kinnitas (Joonis 16).



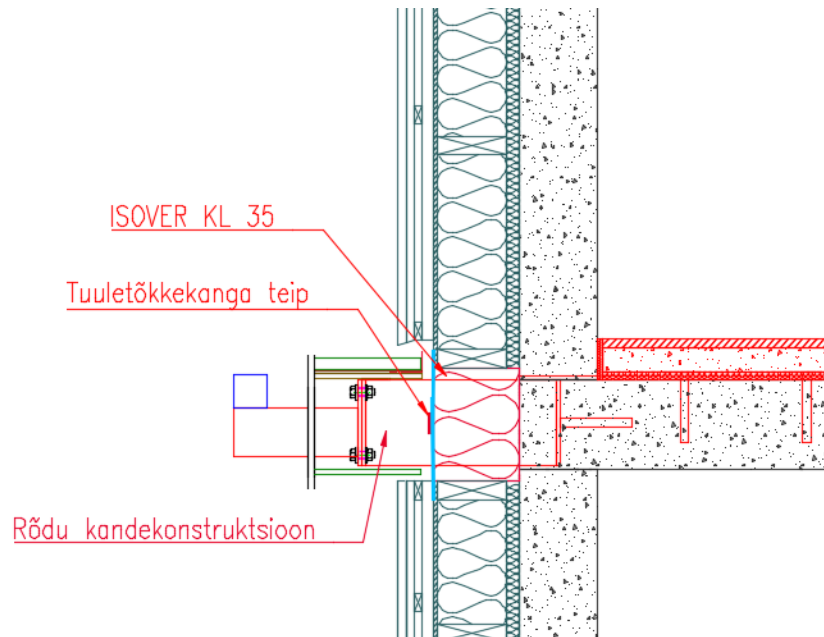
Joonis 16. Soklisõlm, kus elemendile paigaldatakse sokliplaat objektile.

Elemendid olid projekteeritud vertikaalseks paigaldamiseks ehk element paigaldati läbi kahe korruse (vt Lisa 8, Lisa 9). Selleks lahendati läbi vahelae kinnitus, et oleks tagatud heli- ning õhupidavus. Vahelagede kohale tehti elementidele „hammas „, mis täideti tihendusvillaga. Kui element oli õigel kohal, siis kinnitati see tugevdatud nurkraudadega betoonpõranda külge. Tagamaks aurutihedust, liimiti aurutõkkele betoonpinnale. Joonisel 17 on näha vahelaelõiget.



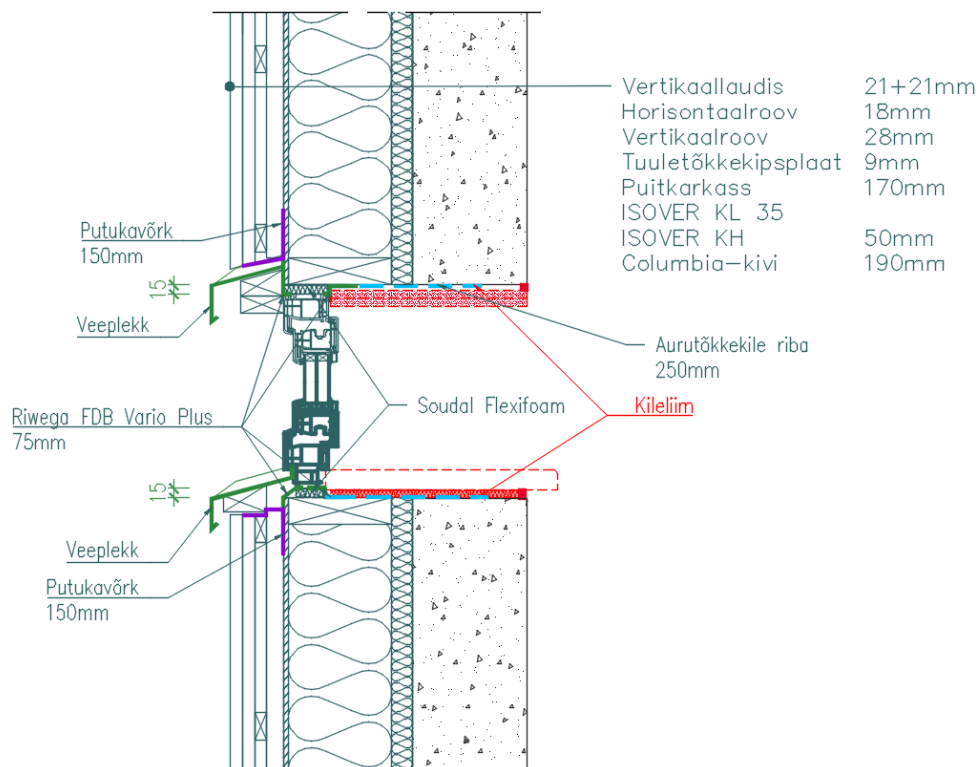
Joonis 17. Seinaelemendi ühendus vahelae betoonpaneeliga.

Keeruliseks kohaks oli puitkarkasselemendi paigaldamine rõdu juures. Ehitajatel oli varasemalt rõdu kandurid paigaldatud vahelae paneelidesse, mis tähendas, et seinapaneeli karkass pidi olema kandurite asukohtades avatud. Projekteerijad lahendasid konstruktsioon selliselt, et kandurid asetsesid täpselt karkassi vahel ning kui elemendid oli paika tõstetud, soojustati kohapeal kandurite ümbrused. Samuti tagati tuulepidavus teipides tuuletõkkekangas pärast soojustamist korrektselt kinni (Joonis 18).



Joonis 18. Seinapaneeli ühendus vahelae betoonpaneelis olevate rõdu teraskanduritega.

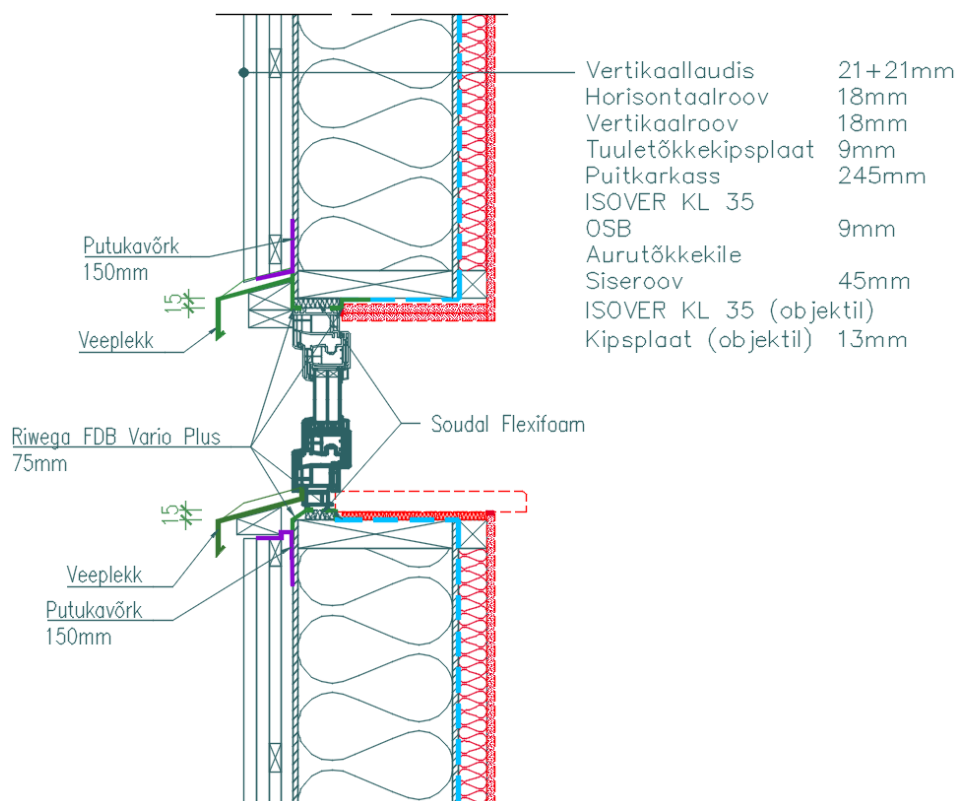
Akende soojustamine toimus vastavalt seinatüübile. Joonisel 19 on näha seinapaneeli tüüp 1 akna paigutust elemendis.



Joonis 19. Akna asukoht seinapaneeli tüübis nr 1.

Jooniselt 19 on näha, et elementi paigaldatud aken tihendati montaaživahuga *Soudal Flexifoam*. Vaht on isepaisuv, mis tagab, et akna ja seinaelemendi vahe oleks sooja- ja õhupidav.

Puitkarkasselemendi teine aknalahendus on välja toodud Joonisel 20.



Joonis 20. Välisseinaelemendi tüüp nr 2 akna paigutus

Akna teipimine seinapaneeli külge teostati pärast montaaživahu kuivamist ja selleks kasutati *Riwega FDB Vario Plus* teipi. Teipi kasutatakse nii sisemiste- kui ka välimiste teipimistöode jaoks. Objektis paigaldati aknasõlmedes olevad aknalauad.

2.1.3 Seinapaneelide tootmine ja transport

AS Welement tootmisseadmed on moodsad ning automatiseeritud. Enamus seadmed on tarnitud Saksamaa päritolu Weimanni kontsernist. Puitkarkasselementide tootmisel järgitakse kõiki ohutusnõudeid ning tootmisprotsesse.

Ladva 1 ja Ladva 3 hoone seinapaneeli hakati tootma 4.07.2017 ning lõpetati 7.08.2017. Tootmiskaht oli 30 – 140 m² paneeli päevas. Elementide tootmine algas materjali järkamisega, kus Weimann Profi WBZ160/13 järkamispingiga lõigati puitmaterjal õigesse mõõtu. Lisaks karkass markeeritakse ning puuritakse vajalikud avad. Materjal transporditakse multifunktsionaalsele seinaliinile, kus valmislõigatud puitmaterjalist valmistati seinapaneeli karkass.

Esmalt kinnitatakse karkassile sisemised kihid, seejärel pööratakse seinapaneel ümber ning soojustatakse mineraalvillaga. Viimasena lisatakse väliskihitidesse minevad materjalid nagu tuuletõkkeplaat, roovid ja laudis. Projekteerimise faasis määratakse masinale erinevad toimingud nagu näiteks valiti kinnitusvahendid materjali kinnitamiseks, määrati saagimine ning laudise ja roovi asukohtade kinnituspunktid.

Tootmisprotsessi viimases osas paigaldatakse elementi avatäited, mille jaoks oli tootmisliinil eraldi sektsioon. Akende paigaldus käis samuti Weimann seadmetega nagu näiteks vaakumtõsteseade JumboErgo 85. Aken tõstetakse avasse, tihendatakse ning lisatakse aknaplekid ja põselauad.

Viimaseks etapiks on elementide pakendamine ning transpordiks ettevalmistamine. Ühte pakki kinnitati kokku 3-4 üksikut seinapaneeli. Seejärel kiletatakse pakk, et transportimise käigus see viga ei saaks. Ladva 1 ja Ladva 3 hoonete puhul kasutati väike veoauto teenust. Joonisel 21 on näha, kuidas elemendid pakiti, kui auto on objektile saabunud.



Joonis 21. Elementide transport Ladva 3 hoone objektile.

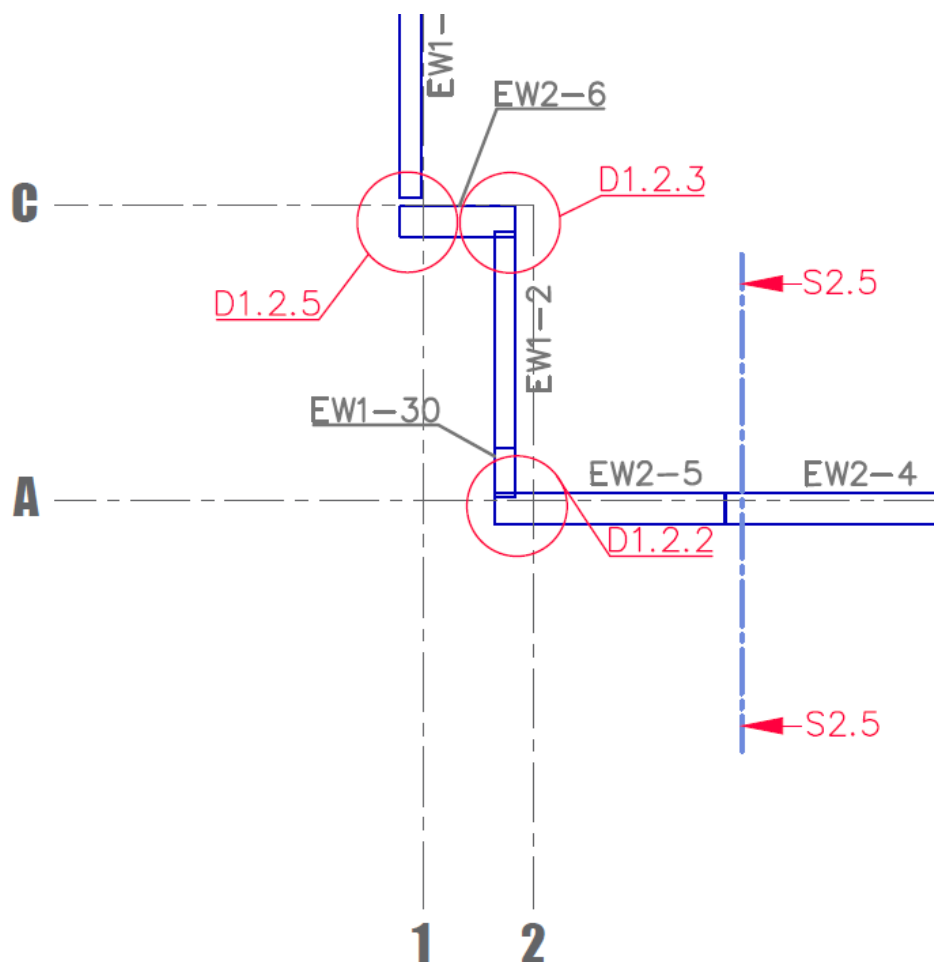
2.1.4 Puitkarkasselementide paigaldus

Ladva 1 ja Ladva 3 puitelementide paigaldajaks oli Savekate OÜ. Paigaldus toimus AS Welement'i platsisõlme jooniste alusel, kus oli märgitud vajalik informatsioon.

Hoone külge paigaldati nurgikud, millele kinnitati aluspuu ehk paigaldusvöö 45x195 mm. Paigaldusvöö kinnitamine toimus enne, kui elemendid objektile saabusid, et kiirendada montaaži aega. Seejärel eemaldati element pakendist ning seinapaneelid tõsteti ühekaupa auto pealt maha.

Puitkarkasselemendid tõsteti kraana abil aluspuule ning jälgiti, et vahelae paneeli ühendus oleks õiges kohas. Kui element oli korrektselt paigaldatud ning loodiga kontrollitud, kinnitati see paigaldusvöö külge.

Seinapaneelid oli nummerdatud ning paigaldust jälgiti elementide plaanilt, mis oli paigaldaja jooniste komplektis. Joonisel 22 on kujutatud hoone ühe nurga elementide plaani (vt Lisa 7).



Joonis

22. Ladva 3 elementide plaanist väljalõige.

2.2 Termografeerimine


Termokaamera teostati mõõtmised nii hoone väljast kui ka seest. Välimise pildistamise abil tuvastati, kas tehases paigaldatud aknad on piisavalt hästi tihendatud. Sisemise pildistamisega sooviti teada saada, kas pinnatemperatuur viitab elementide korrektsele ühendusele nii omavahelistes ühendustes kui ka nurgäühendustes.

Termograafilised mõõtmised toimusid tingimustes, kus sisetemperatuur oli elamutes keskmiselt $+21^{\circ}\text{C}$ ning välistemperatuur -6°C . Termografeerimise käiku mõjutasid küttekehad ruumides, mis võisid osade seinte pinnatemperatuuri tõsta.

Pildistamine toimus hommikul, et vältida päikese kiirgust, mis mõjutaks väljast termografeerimist. Ilmastikuolud olid termografeerimiseks soodsad- pilvine taevas, madal temperatuur ning varasematel päevadel ei esinenud päikesepaistet. Temperatuuride erinevus oli 27° , mis on piisav, et mõõtmiste tulemused oleksid adekvaatsed arvutamamiseks temperatuuriindeksi.

Diplomitöös kasutati termokaamerat FLIR B50, mille tehnilised andmed on esitatud Tabelis 3.

Tabel 3. Termokaamera Flir B50 tehnilised andmed (Flir 2018)

Nimetus	Mõõtevahemik	Mõõtetäpsus
	$-20^{\circ}\text{C} + 120^{\circ}$	$\pm 2^{\circ}\text{C} (\pm 2\% \text{ lugemist})$

Sisetemperatuuri mõõtmiseks kasutati digitaalset termomeetrit ning välistemperatuuri andmed võeti Tartu Ülikooli Füüsika Instituudis asuvast ilmajaamast. Kontrolliks mõõdeti välistemperatuuri samuti ehitusplatsil ning erinevus oli ainult $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

Kõik termokaameraga teostatud pildid töödeldi programmiga *Flir QuickReport 1.2 SP2*. Uuritavale fotole oli võimalik määrata konkreetsed punktid, mille temperatuur mõõdeti ja arvutati temperatuuriindeks.

2.3 Temperatuurivälja tarkvara *THERM* kasutamine

Temperatuurivälja tarkvaraga *THERM 6.0* sooviti võrrelda termografeerimisel saadud tulemusi. Esmalt tuli programmi joonestada uuritav sõlm, liitekoht või nurk ning määrata igale materjalile soojuserijuhtivus.

Programmis on võimalik valida erinevate materjalide vahel ja kui kasutatud materjali valikus ei esinenud, sai uue materjali lisada. Seejärel määrati õhutemperatuurid nii sees- kui ka väljaspool. (Õiger et al. 2009)

Tarkvara abil teostati vastavalt tarindi liitekohale arvutused, kus arvestati materjale ning nende paiknemist ja omadusi (Õiger et al. 2009). Lõpptulemusena oli võimalik välja tuua joonised sõlmedest, kus on näha temperatuurijaotus, soojusvoo suund ning samasoojusjooni ehk isoterme.

2.4 Mürapidavuse mõõdistamine

Müra mõõtmise katsed teostas Akukon Oy Eesti filiaal. Katsed toimusid Ladva 1 kortermajas ning mõõtmisi teostati kaks korda erinevates maja osades (vt Lisa 1). Ladva 1 helipidavuse mõõtmised ja arvutused teostati vastavalt standardite EVS-EN-ISO 16283-1/2 ja EN ISO 717-1/2 nõuetele. Mõõtmist teostas spetsialist ning kasutati mõõteseadmeid, mis on esitatud alljärgnevas Tabelis 4.

Tabel 4 Mõõdistamisel kasutatud instrumendid

Katseseadeldis	Seadeldise nimetus	Mudel
	Kalibraator	Brüel & Kjaer 4231 sn.2253338 (Brüel&Kjaer, 2018)
	Müramõõdik	Brüel & Kjaer 2250 sn.3004362 (Brüel&Kjaer, 2018)
	Mikrofon	Brüel & Kjaera 4189 sn.2919520 (Brüel&Kjaer, 2018)
	Löögimüraallikas	Brüel & Kjaera 3207 sn.2526663 (Brüel&Kjaer, 2018)
	Helivõimendi/kõlar	dB Technologies DVX10 nr. L389000208 (dBTechnologies, 2018)

Esimene mõõtmine teostati korterite nr 13 ja nr 17 vahel. (vt Lisa 1 ja Lisa 2) Helivõimendi/kõlar asetati magamistuppa ning mõõdeti esimesena õhumüra. Õhumüra mõõtmisele järgnes sammumüra mõõtmine. Sammumüra mõõtmiseks asetati löögiallikas esimese korruse magamistuppa ning mõõtmisi tehti teisel korrusel.

Teine mõõtmine oli korterite nr 5 ja nr 12 vahel. (vt Lisa 1) Selle nurga mõõtmiseks arvestati kontaktpinnaks 10 m², mis on standardiga määratud, kui ühenduspind on tegelikult väiksem. Nende korterite puhul teostati õhumüra ja sammumüra mõõtmised.

2.5 Piirete õhupidavus

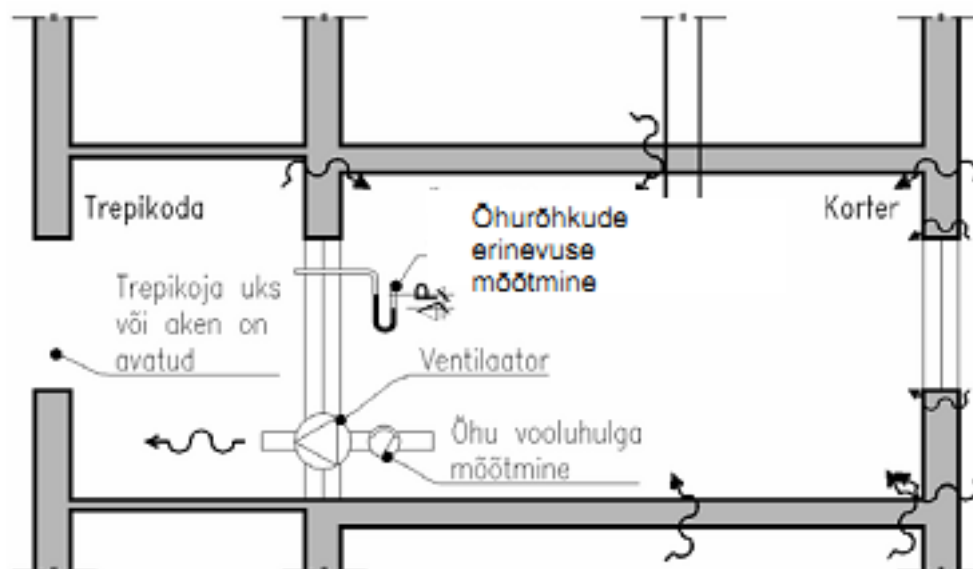
Õhupidavuse mõõtmisi teostades tugineti EVS 9972:2015 standardi nõuetele, milleks on „Hoonete soojuslik toimivus. Hoonepiirete õhulekke määramine. Ventilaatoriga survestamise meetod“.

Mõõtmiste teostamiseks kasutati *BlowerDoor* mõõteaparaati, mille tehniline informatsioon on esitatud Tabelis 5 (Conservatory 2018).

Tabel 5. *BlowerDoor* katseaparaadi andmed (Conservatory 2018)

Katseseadeldis	Nimetus	Mõõtevahemik
Mõõtur	DG-700	-1250Pa kuni 1250Pa
Ventilaator	<i>BlowerDoor</i> Model 3	5 l/s kuni 2973 l/a
Raam	Reguleeritav alumiiniumraam	Kõrgus: 1,32 m kuni 2,344m Laius: 0,71m kuni 1,01m
Tarkvara	TECTITE	

BlowerDoor katse teostati ühe korteri kaupa, kus mõõteseadeldis paigaldati ukseavasse. Joonisel 23 on illustreeriv põhimõte, kuidas *BlowerDoor* seadeldist kasutatakse.



Joonis 23. *BlowerDoor* katse põhimõte (Autor: Kalamees 2008).

BlowerDoor katse teostati Ladva 1 ja Ladva 3 kortermajas korterites nr 5 ja nr 13 ehk kokku katsetati 4 korterit.(vt Lisa 1. ja Lisa 3.) Katse teostati kõigis korterites ühte moodi.

Esmalt tihendati kõik ventilatsiooni *fresh*-avad ning vannitubades veesõlme luugid (Joonis 24, Joonis 25).



Joonis 24. Ladv 1 korter 13 *fresh*-klapi sulgemine „õhupalliga“.



Joonis 25. Ladv 1 korter 13 veesõlme luugi teipimine.

Järgmisena paigaldati korteri välisukse avasse raam ja ventilaator, mis ühendati arvutiga (Joonis 26).



Joonis 26. *BlowerDoor* katseseadeldiste valmisolek Ladva 1 korter 5.

Korterite välispiirete mõõtmise tulemusi eristati kahe parameetri põhjal:

- õhulekkearv q_{50} , $\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$, mis näitab lekkeõhu suurust 50 Pa juures. Õhulekkearv määratakse korteri piirdetarindite (välisseinad, korteritevahelised seinad ja vahelaed, põõningulaed) pindalale (Hoone Energiatõhususe Miinimumnõuded 2015);
- õhuvahetukordsus n_{50} , h^{-1} , mis näitab mitu korda vahetub õhk ühes tunnis kogu hoones 50 Pa (paskal) sise- ja välisrõhu erinevuse korral (Tervemaja 2017).

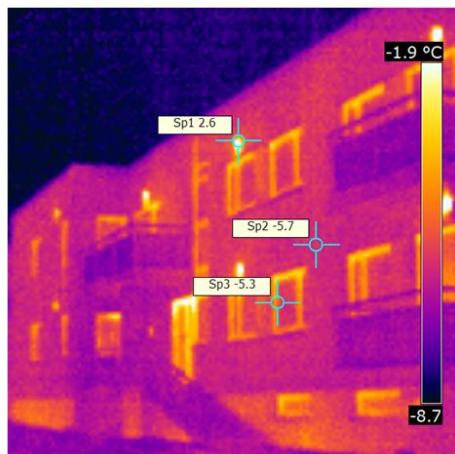
Õhulekkekohtade tuvastamiseks kasutati termokaamerat *Flir B50*, millega pildistati üles õhulekke kohad, kui ruumi oli tekitatud alarõhk. Katse käigus keskenduti peamiselt seinapaneelide ühenduskohtadele ning vahelae ja sokli ühendustele. Korterites, kus mõõtmisi teostati, oli kõrge õhutemperatuur, mis võis mõjutada termografeerimisel sisepinnatemperatuure. Ladva 1 korteris nr 13 oli sise õhutemperatuur 23,1 °C ja korter nr 5 24,0°C. Ladva 3 kortermajas vastavalt korter nr 13 oli 24,2 °C ja korter nr 5 oli temperatuur 24,8 °C.

3 TULEMUSED JA ARUTELU

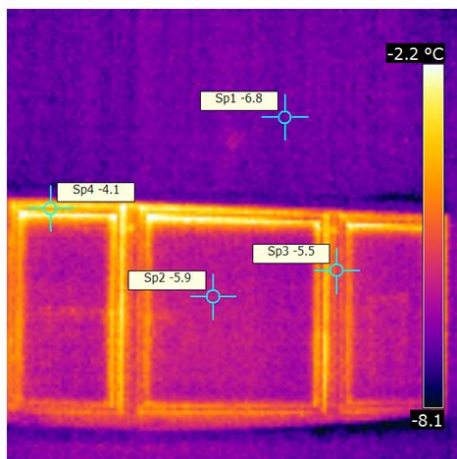
3.1 Termograafia mõõdistuse tulemused

3.1.1 Väline termografeerimine

Hoone välisfassaad pildistati üles nii termo- kui ka tavakaameraga ja piltide asukohad leiate hoone plaanidelt (vt Lisa 1. kuni Lisa 4.). Väljast pildistamisel ei paistnud silma seinapaneelide liitumiskohad, kuna konstruktsiooni välimises kihis olev tuulutusvahe ühtlustas pildistamisel pinnatemperatuuri. Väljast teostatud piltidelt sai järeldada, kas akende paigaldus paneelis oli teostatud korrektselt (Joonis 27 ja 28).



Joonis 27. Ladva 3 välisfassaadist termopilt ja foto.

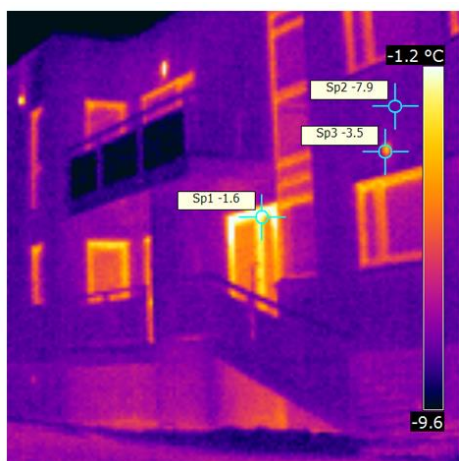


Joonis 28. Ladva 3 välisfassaadis asuva akna termopilt ja foto.

Välisfassaadi piltidelt on näha, et pildistamise hetkel olid *fresh*-klapid avatud, et hoonest kuivaks välja ehitusaegne niiskus. Fotografeerimisest saab järeldada, et seinaelemendi välispinna temperatuur oli vahemikus $-8,6 \dots -6,2$ °C. Akende ümbruses oli temperatuur keskmiselt $-6,2 \dots -3,5$ °C.

Jooniselt 28 on näha, et aknaraam on soojustatud ühtlaselt seinapaneelis. Kui fassaadi temperatuur on $-6,8$ °C oli akna raami temperatuur $-5,5$ °C. Akna lengi ja elemendi ühenduskohas on temperatuuriks $-4,1$ °C. Võrreldes hoone esifassaadi pinnatemperatuuridega oli Joonisel 28 hoone külg avatud tuulele, mis jahutas seinapaneeli rohkem. Võrreldes Joonist 27 ja Joonist 28 on seina pinnatemperatuuride erinevus $1,1$ °C. Kõige külmem koht Joonisel 28 oli akna parem alumine nurk. See võis olla tingitud lumest, mis oli aknalaua peale kogunenud ning jahutanud seda akna nurka.

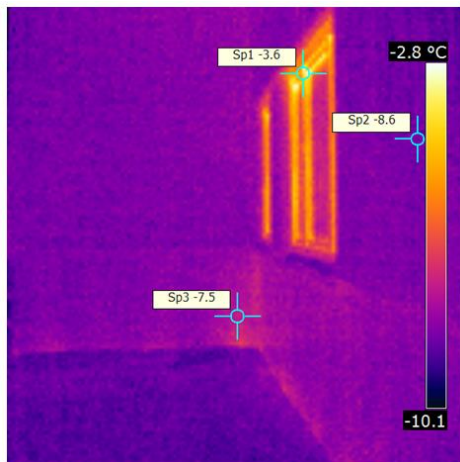
Ladva 1 kortermaja esifassaadi temperatuurid olid sarnased Ladva 3 kortermajale (Joonis 29).



Joonis 29. Ladva 1 esifassaadi termopilt ja foto.

Kahe maja esifassaadi võrdluses on näha, et seinapaneeli pinnatemperatuur oli Ladva 3 hoone puhul $-6,8 \dots -6,2$ °C ja Ladva 1 puhul $-8,7 \dots -6,4$ °C. Pinnatemperatuuride erinevused võis põhjustada see, et Ladva 1 oli rohkem avatud tuulele, mis jahutas seinapaneeli pinnatemperatuure rohkem. Vaadeldes *fresh*-avade kohal pinnatemperatuure oli Ladva 1 avad mõõtmishetkel kinnisemad kui Ladva 3 kortermaja puhul.

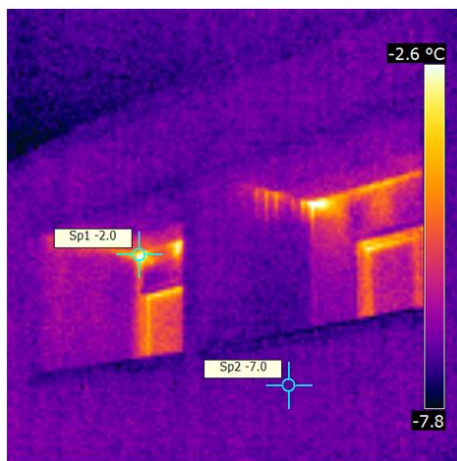
Pinnatemperatuuride muutust oli märgatavalt näha Ladva 1 kortermaja otsaseinas, mis oli tuulele kõige rohkem avatud (Joonis 30).



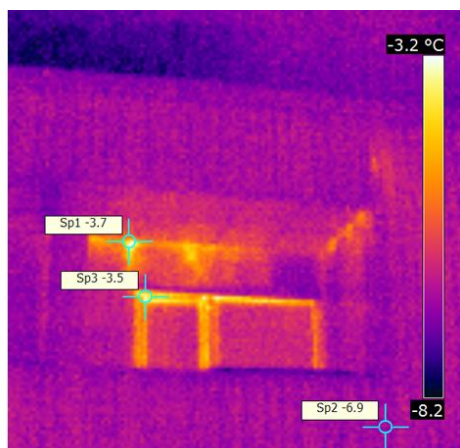
Joonis 30. Ladva 1 otsaseina termopilt ja foto.

Joonisel 30 on näha samuti, et kõige madalam temperatuur tekib akna plekile, kuna seal on lumi, mis jahutab akna alumist osa.

Välisel pildistamisel selgus, et kõige keerulisemaks kohaks paneelide paigaldamisel oli lodža piirete ümbrus. Termokaameraga avastati, et lodža ühenduskoht välisseina elemendiga ei olnud piisavalt hästi soojustatud (Joonis 31 ja 32). Peale termografeerimist andis töö autor objektijuhile teada, millistes kohtades tuleb avada konstruktsioon ning parandada olukord.



Joonis 31. Ladva 3 lodža termopilt ja foto.

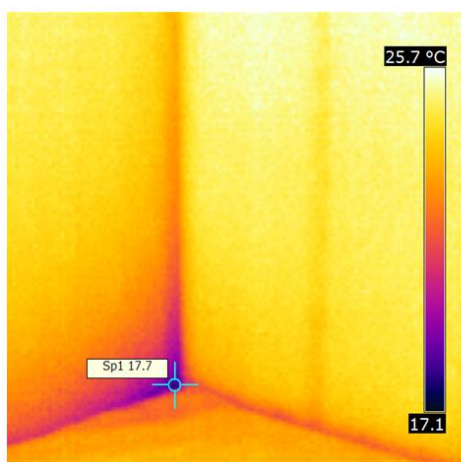


Joonis 32. Ladva 1 lodža termopilt ja foto.

Välise termografeerimise tulemusena selgus, et aknad on tehases korralikult tihendatud ning pildistamise hetkel esinesid peamised soojuskaod lisaks lodža nurkadele läbi *fresh*- avade ning lahtiste akende. Paigaldaja tõi välja, et nurgäihendused olid projekteerijate poolt hästi läbi mõeldud.

3.1.2 Sisemine termografeerimine

Hoone korterid pildistati üles nii termo- kui ka tavakaameraga ja piltide asukohad leiata hoone plaanidelt (vt Lisa 1 kuni 4). Sisemisel termografeerimisel keskenduti peamistele nurgäihendustele ning puitkarkasselementide omavahelistele ühendustele. Nurgäihenduskohti oli projekteerimise järgi kaks – element ja Columbia-kivi õõnesploki nurk ning element-elementi nurgäihendus. Joonisel 33 on Ladva 3 korteris nr 4 seinapaneeli ja Columbia-kivi õõnesploki ühendusnurk.



Joonis 33. Ladva 3 korter nr 4 seinapaneeli ja Columbia-kivi õõnesploki nurgäihenduse termopilt ja foto.

Jooniselt 33 on näha, et suuri õhulekkeid nurgaiühenduses ei esine. Element on korrektselt kinnitatud Columbia-kivi õõnesploki külge. Fotolt saab järeldada, et tihendusvill elemendi ja kivi vahel ei ole transpordi ja montaaži käigus kahjustada saanud (vt. Joonis 13) Kõige jahedamaks punktiks oli betoonpinna ja elemendi liitumiskoht, mille temperatuur on 17,7°C. Arvutades temperatuuriindeksi nurgaiühenduses, saab järeldada et selles kohas ei ole ohtu kondenseerumiseks ega hallituse tekkeks. Tabel 6 annab ülevaate temperatuuriindeksi arvutamisest Ladva 3 korter nr 4 asuvas nurgaiühenduses.

Tabel 6. Temperatuuriindeksi arvutamine Ladva 3 korter nr 4 seinapaneeli ja Columbia-kivi õõnesploki nurgaiühenduses (vt. valem 1.1)

Joonis nr	Sisetemperatuur $t_i [^{\circ}C]$	Välistemperatuur $t_e [^{\circ}C]$	Pinnatemperatuur $S_p = t_{si} [^{\circ}C]$	Temperatuurindeks f_{Rsi}
Joonis 33	21,5	-6,1	17,7	0,9

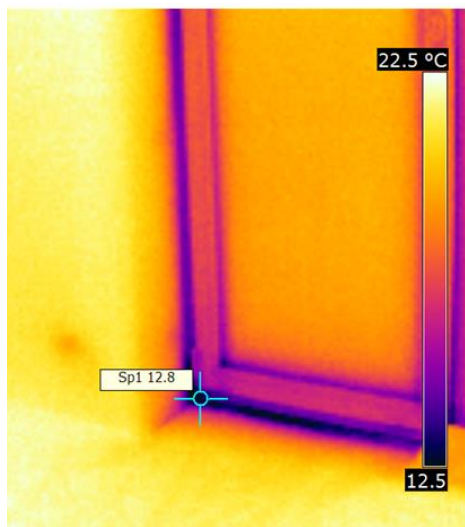
Ladva 3 korter nr 13 sama konstruktsioonilise lahendusega nurgaiühenduse õhupidavusest annab ülevaate Joonis 34.



Joonis 34. Ladva 3 korter nr 13 seinapaneeli ja Columbia-kivi õõnesploki nurgaiühenduse termopilt ja foto.

Jooniselt 34 on näha, et soojuskadu esines seinte ja sokli ühenduspunktis. Termografeerimise tulemustest ilmneb, et elemendi ja kiviseina pinnatemperatuurid olid kõrged, mis oli tingitud ehitusjärgsest intensiivsest kütmisest.

Välise termografeerimise tulemustes selgus, et kõige kriitlisem koht oli lodža ümbruses. Sisemisel fotografeerimisel esines samuti lodža piirkonnas kriitilisi olukordi. Sisemine termografeerimine Ladva 1 kortermaja korteris nr 7 lodža piirkonnas on esitatud Joonisel 35, kus on näha soojuskadu akna all.



Joonis 35. Ladva 1 nurgäühenduse termopilt ja foto.

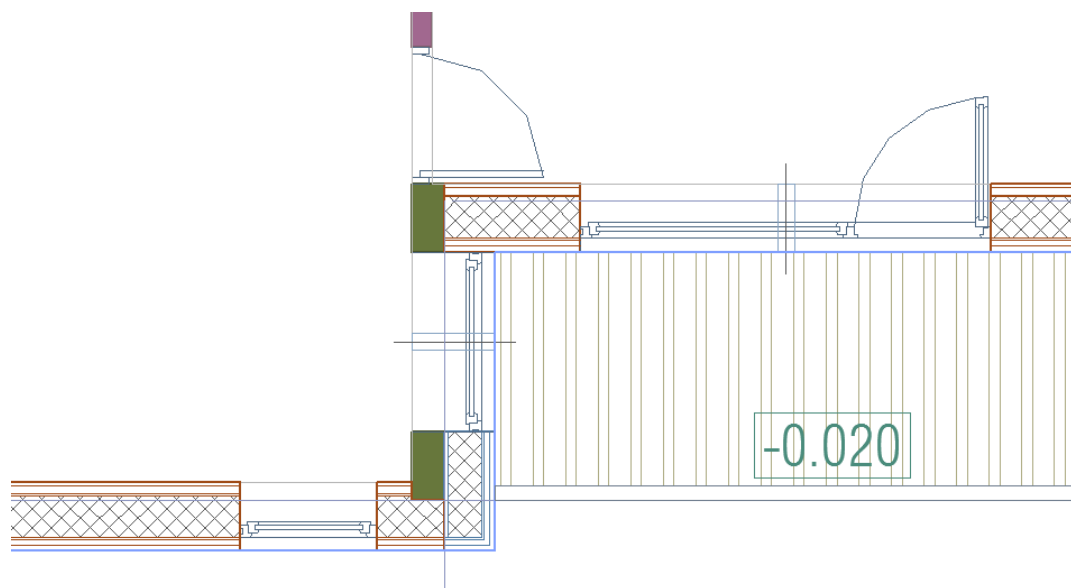
Jooniselt 35 on näha, et akna alumisse äärde tekib külmasild. Soojakao tekke põhjuseks võib olla akna ebapiisav ja -korrektne tihendamine. Teiseks põhjuseks võib olla, et transportimise käigus aken nihkuma konstruktsioonis, mille tulemusena montaaživahu terviklikkus sai kahjustada. Samuti võis olla külmasilla tekke põhjuseks vähene või kehvasti soojustatud lodža konstruktsioon (vt Joonis 18). Objektil tuli ehitajal soojustada kandurite vaheline ala, mis võis olla teostatud ebakorrapäraselt.

Arvutades temperatuuriindeksit saadi tulemuseks, et akna alumises ääres on oht kondenseerumiseks ja hallituse tekke oht on piiripealne (Tabel 7).

Tabel 7. Temperatuuriindeksi arvutamine Ladva 1 nurgäühendustes (vt. valem 1.1)

Joonise nr	Sisetemperatuur $t_i [^{\circ}C]$	Välistemperatuur $t_e [^{\circ}C]$	Pinnatemperatuur $S_p = t_{si} [^{\circ}C]$	Temperatuurindeks f_{Rsi}
Joonis 35	21,3	-6,1	12,8	0,7

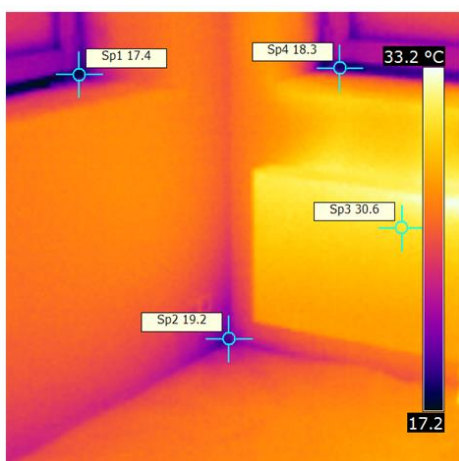
Paigaldajale olid keerulisteks kohtadeks veel nurgad nagu välja toodud Joonisel 36 (vt Lisa 1 kuni 4).



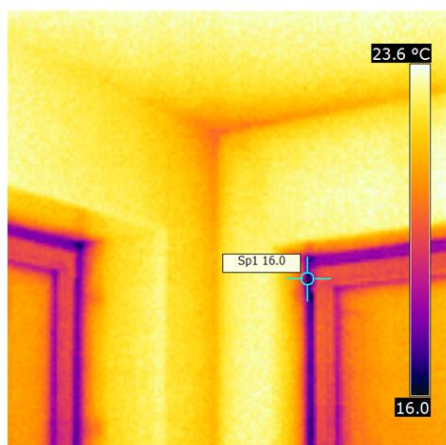
Joonis 36. Keerulised puitkarkasselementide ühendusnurgad Ladva 1 ja Ladva 3 kortermajades.

Jooniselt 36 on näha, et elementide kinnituseks on vähe ruumi ja sinisega märgitud paneeli on tehases paigaldatud aken. Seega pidid paigaldajad olema ehitusplatsil eriti tähelepanelikud, et ühendusnurgad kinnitataks korrektselt, ja samaaegselt jälgima, ei aken kahjustada ei saaks.

Termografeerimise tulemused Ladva 1 maja esimese ja teise korruse puhul kirjeldatud nurgast on esitatud joonisel 37 ja 38.



Joonis 37. Ladva 1 korter 1 välimise nurgasõlme alumine termopilt ja foto.



Joonis 38. Ladva 1 korter 6 välimise nurgasõlme ülemine termopilt ja foto.

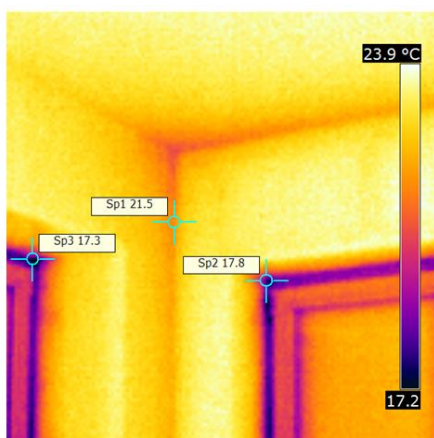
Tulemustest on näha, et küttekeha soojendab esimesel korrusel paneelseina. Nurgaiühenduses oli pinnatemperatuur 19,2 °C, millest saab järeldada, et kondenseerumise ega hallituse tekke ohtu pole. Akna lengi äärtes on temperatuuride 17,2...18,4 °C. Termopiltidelt saab järeldada, et elemendi ja kiviseina ühenduskoht on teostatud hästi ja tihendusvill ei ole paigalduse käigus kahjustada saanud. Sokliühenduses, kus temperatuur oli 19,2 °C, ei esinenud olulisi soojuskadusid.

Tabelis 8 on kortermajale Ladva 1 välja arvatud temperatuurindeksid, mis kinnitavad sõlme korrektset tehnilist teostust.

Tabel 8. Temperatuurindeksi arvutamine Ladva 1 nurgasõlmes (vt. valem 1.1)

Joonise nr	Sisetemperatuur t_i [°C]	Välistemperatuur t_e [°C]	Pinnatemperatuur $S_p = t_{si}$ [°C]	Temperatuurindeks f_{Rsi}
Joonis 37	21,3	-6,1	19,2	0,9
Joonis 38	21,3	-6,1	16,0	0,8

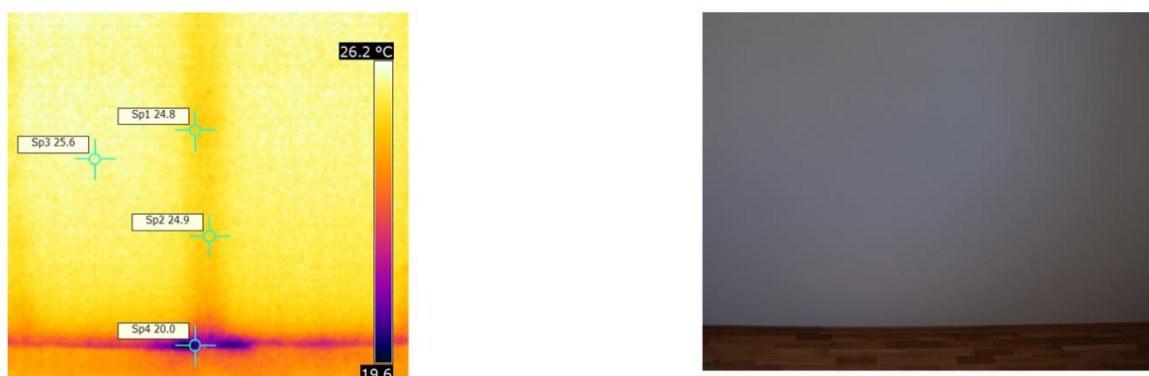
Võrreldes Ladva 3 teise korruse sama nurgaiühenduse termopildiga on näha, et akende ümbruses esinevad sarnased pinnatemperatuurid (Joonis 39).



Joonis 39. Ladva 3 nurgasõlme ülemine termopilt ja foto.

Kahe kortermaja termografeerimisel samast nurgaihendusest sai järeldada, et elemendid olid omavahel korrektselt kinnitatud ning tihendusvill, mis elemendi külge tehases paigaldati, ei olnud montaaži käigus kahjustada saanud ning oli säilitanud oma algse kuju. Akende lengi ümbruses esinesid pinnatemperatuuride erinevused, mis võisid olla põhjustatud tühimikest lengi ja seinapaneeli karkassi vahel. Pinnatemperatuuri mõjutas kindlasti radiaatori temperatuur.

Hoone sisemise termografeerimise käigus ilmnas asjaolu, et osade seinte pinnatemperatuurid olid väga kõrged (üle 21 °C). Peamiselt tekitas sellise olukorra intensiivne ehitusjärgne kütmine, mis soojendas seinu. Elementide omavahelistes liideses olid ühtlased pinnatemperatuurid, mis näitas, et soojalekkeid läbi kahe seinapaneeli ei esinenud (Joonis 40).



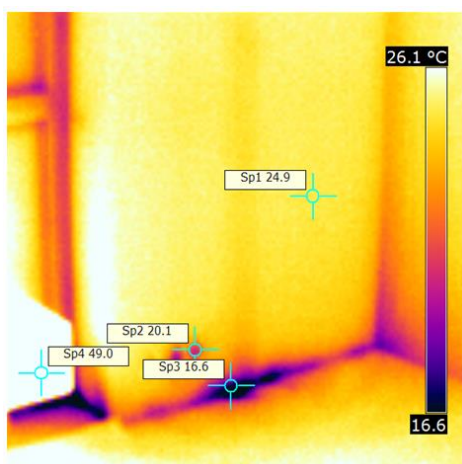
Joonis 40. Ladva 1 elementide liitekohade termopilt ja foto.

Joonisel 40 pinnatemperatuuri järgi arvutatud temperatuurindeks on esitatud Tabelis 9.

Tabel 9. Ladva 1 elementide ühenduskoha temperatuurindeks koos algandmetega (vt. valem 1.1)

Joonis nr	Sisetemperatuur t_i [°C]	Välistemperatuur t_e [°C]	Pinnatemperatuur $S_p = t_{si}$ [°C]	Temperatuurindeks f_{Rsi}
	21,3	-6,1	20,0	0,9

Pildistamise käigus selgus koht, kus oli pistikupesad halvasti soojustatud. Seinapaneelide sisemine mineraalvill ning kipsplaat paigaldati objektile ja enne nende tööde tegemist paigaldas elektrik vajalikud juhtmed elemendi külge (Joonis 41).



Joonis 41. Ladva 1 seinapaneeli paigaldatud pistikupesade termopilt ja foto.

Temperatuuriindeksi järgi ei teki mainitud pistikupesade ümber kondenseerumist ega hallitust (Tabel 10).

Tabel 10. Ladva 1 paneeli pistikupesade ümbruse ning sein ja põranda liitekohade temperatuuriindeks koos algandmetega (vt. valem 1.1)

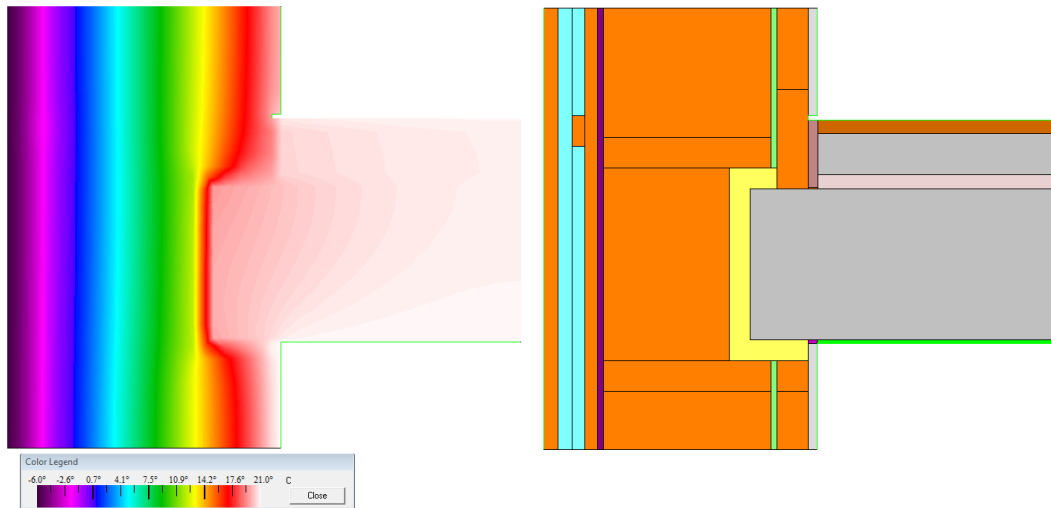
Joonise nr	Sisetemperatuur t_e [$^{\circ}\text{C}$]	Välistemperatuur t_i [$^{\circ}\text{C}$]	Pinnatemperatuur $S_p = t_{si}$ [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatuurindeks f_{Rsi}
Joonis 41	21,3	-6,1	20,1	1,0
	21,3	-6,1	16,6	0,8

Joonisel 41 on näha, et elemendi ja põranda ühenduskohas on temperatuur madal, kuid seal ei esine ohtu kondenseerumisele ega hallitusele. Vaadates sokli lahendust (vt Joonis 15), võib põhjuseks olla ebakorrapärane soojustamine.

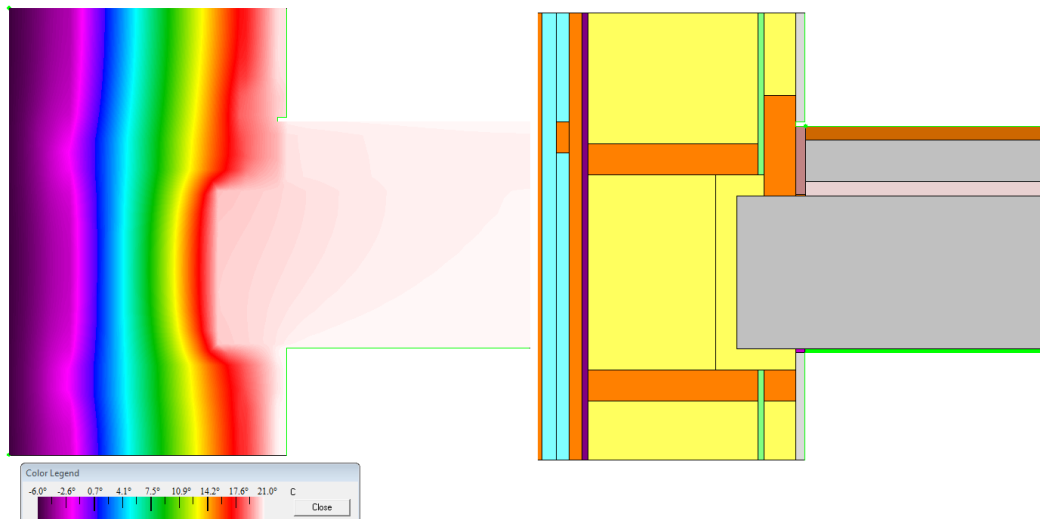
Sisemine termografeerimine tõi selgelt välja, millistele ühenduskohadele tuleb tulevikus projekteerijatel, ehitajatel ja paigaldajatel tähelepanu pöörata.. Elementide omavahelised ühendused olid soojapidavad ning õhulekkeid seal ei esinenud. Soojuskadusid esines peamiselt seinapaneeli ja Columbia-kivi õõnesploki soklisõlmes, mida tuleks avada ja kontrollida, kas välisseina paigaldatud soojustus oli korrektselt kinnitatud, et tagada soojapidavus. Akende ümber ei esinenud suuri soojuskadusid. Termografeerimise tulemustest saab üldiselt järeldada, et hoone soojustamine seinapaneelidega oli teostatud hästi. Soovitav oleks teostada korduv termografeerimine, et kontrollida eksploatatsioonis hoone erinevate konstruktsiooniosade ja nurga liitekohtade pinnatemperatuure.

3.2 Temperatuurivälja tarkvara *THERM* tulemused

THERM temperatuurivälja programmiga lahendati läbi vahelaesõlm, mida võrreldi termografeerimisel saadud tulemustega. Vahelaepaneeli ja seinaelemendi ühenduspunktis oli temperatuur keskmiselt 21,5°C juures, kasutades *THERM* programmi oli vahelae pinnal temperatuur 20,2°C (Joonis 42, Joonis 43).

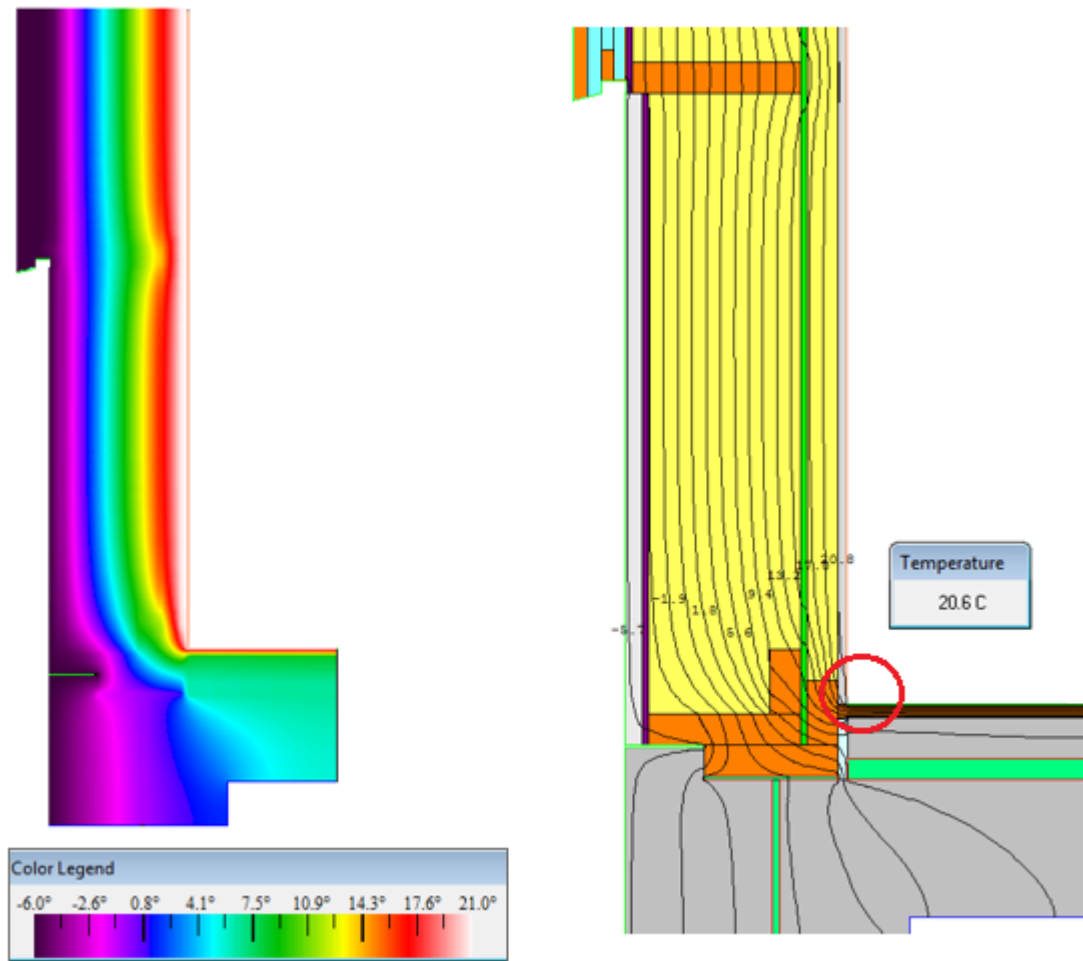


Joonis 42. *THERM* tarkvara põhine soojusvoolu jaotus karkassi kohal.



Joonis 43. *THERM* tarkvara põhine soojusvoolu jaotus mineraalvilla kohal.

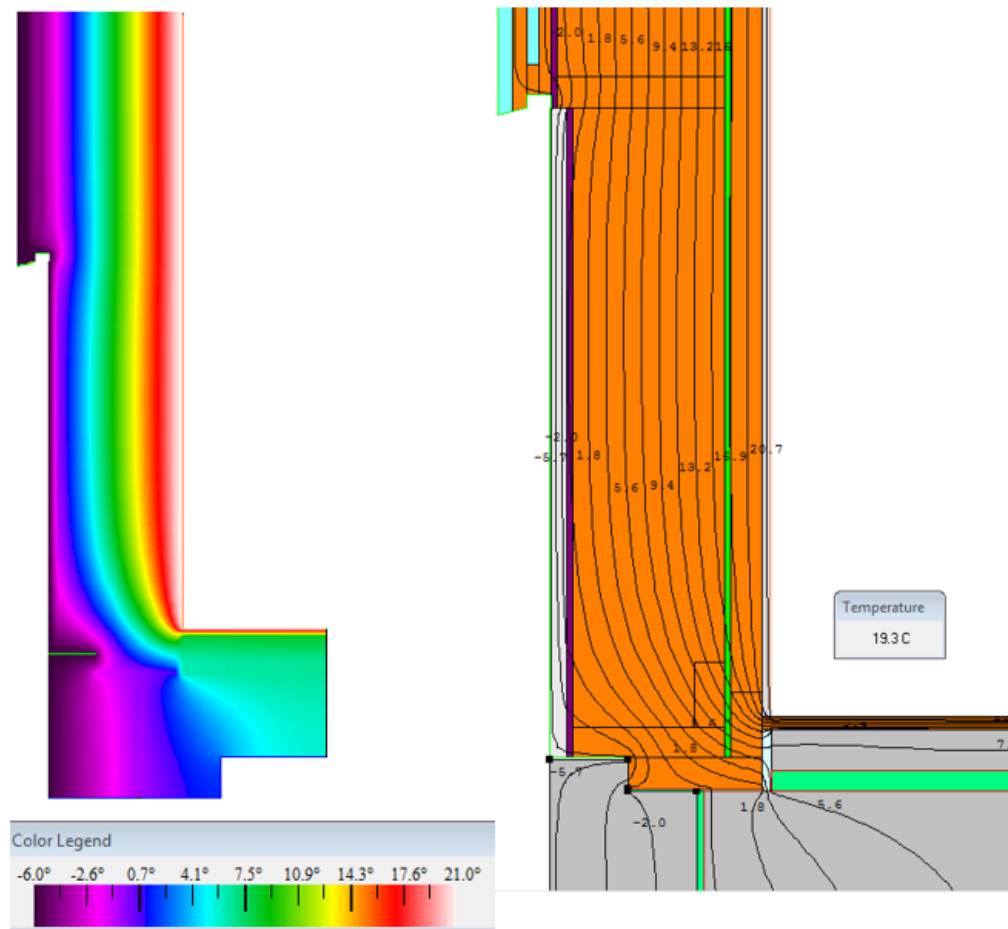
THERM programmiga käsitleti soklisõlme, kus elemendi viimistluskiht, milleks oli *Minerit* plaat, paigaldati objektile. Joonisel 44 on näha soojusjaotust sõlmes, kus lõige on tehtud soojustuskihis.



Joonis 44. *THERM* tarkvara põhine soojusvoolu jaotus soklisõlmes mineraalvilla kohal.

Jooniselt 44 on näha, et voodrilaud on ühtlustunud välistemperatuuriga ning temperatuuri muutused toimuvad tuuletõkkeplaadis. Kuna mineraalvilla sooja-erijuhtivus on väiksem puidu sooja-erijuhtivusest, on Jooniselt 44 näha, kuidas toimub temperatuuri muutused konstruktsioonis. Soklis olevete aluspuidu ja elemendipuidu kaudu kandub edasi külm õhk ruumi ning ruumi sisemises nurgas on temperatuur 20,6 °C.

Sama soklisõlme puhul on tehtud arvutused, kui lõige on karkassi kohal (Joonis 45).



Joonis 45. *THERM* tarkvara põhine soojusvoolu jaotus soklisõlmes karkassi kohal.

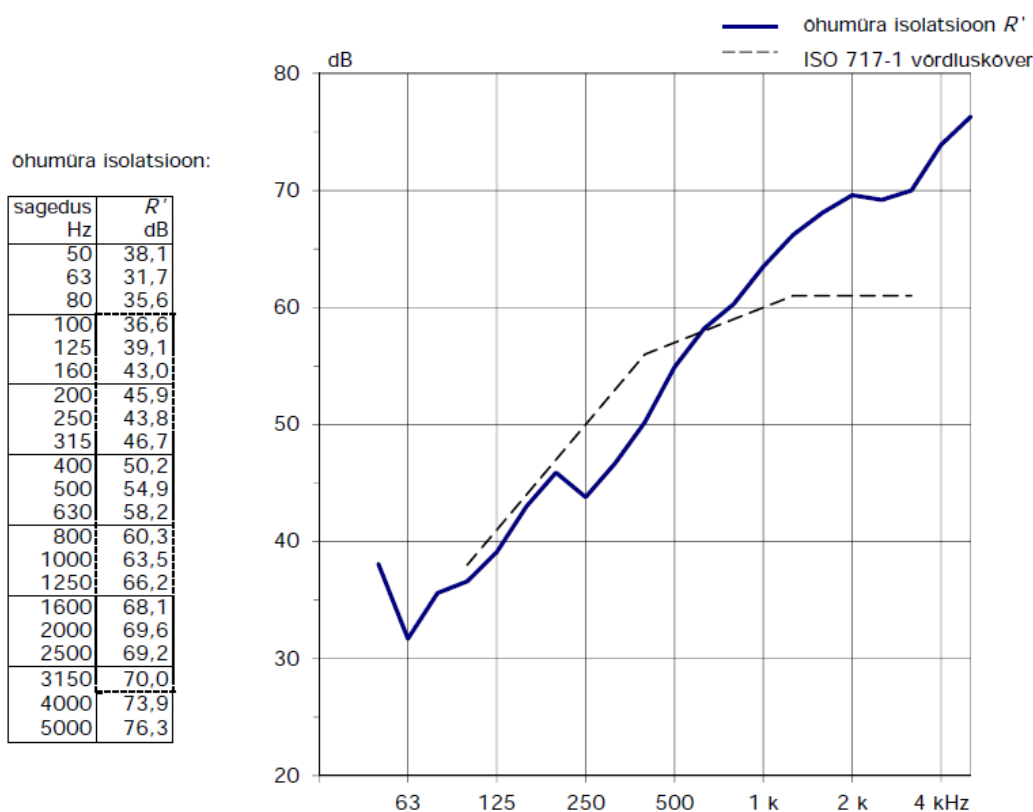
Temperatuuride erinevus kahe lõike vahel on 0,9 °C. Karkassi lõikest on näha, et soojusvool liigub ühtlaselt mööda puitu kuni kipsplaadini. Elemendi ja vundamendi ühenduses on näha, kuidas toimub temperatuuri muutus betoonilt puidule minekul.

Termografeerimisel oli vahelaepaneeli ja elementid ühendus kohtades pinnatemperatuur keskmiselt 21,5 °C. Temperatuurvälja tarkvaraga saadud tulemuseks oli 20,2 °C. Mõlema katsetuse tulemustest saab järeldada, et vahelaesõlmes ei ole hallituse ega kondenseerumise ohtu. Sokli ühendusõlme keskmiseks termografeerimise tulemuseks oli 17,7 °C. *THERM* tarkvaraga saadi pinnatemperatuuriks keskmiselt 19,6 °C. Termografeerimisel saadud madalam temperatuur sokli ja seinapaneeli ühendusliites võib olla tingitud sokli ebakvaliteetsest soojustamisest.

Kokkuvõttes *THERM* tarkvara ja termografeerimise tulemuste võrdluse alusel sai järeldada, et antud sõlmedes arvutatud temperatuuriindeksid olid piirväärtustest suuremad, siis ei ole hallituse ega kondenseerumise ohtu.

3.3 Müra mõõdistamise tulemused

Müra mõõtmiseks kasutatud korterid olid ära märgitud hoone põhiplaanidel (vt Lisa 1. ja Lisa 2). Korter nr 13 ja korter nr 17 vahel õhumüra mõõtmis tulemus oli 57 dB, mis vastab standardile EVS 842:2003, kus on õhumüra miinimum nõudeks 55 dB. Õhumüra tulemustes oli arvestatud parandusi, mis võivad tulemust mõjutada nagu näiteks kõne, muusika ja raadio. Joonisel 45 on välja toodud Akukon Oy Eesti filiaal poolt teostatud müramõõtmise graafik, kus on võrdlused korter nr 13 ja korter nr 17.



Joonis 46. Korter nr 13 ja korter nr 17 õhumüra mõõtmisprotokoll (Autor: Akukon Oy Eesti filiaal).

Korter nr 13 ja korter nr 17 vaheline löögimüra jäi vastavalt standardis määratud suuruste vahemikku. Löögmüra kahe korteri vahel oli 49 dB.

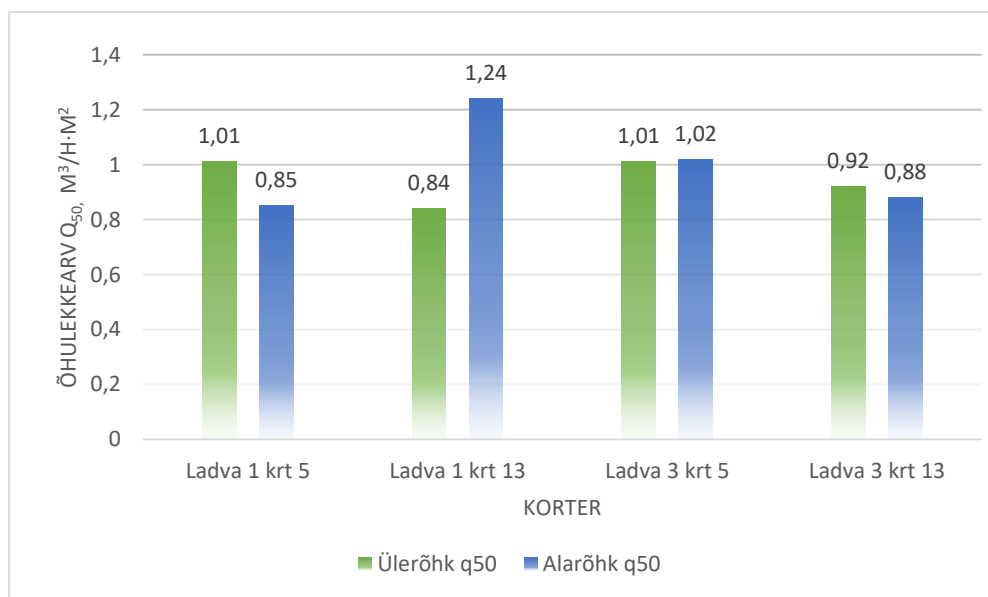
Mõõtmisi teostati veel korter nr 5 ja korter nr 12 vahelisel alal (vt Lisa 1). Kuna korterite vahel puudus ühtne seinapaneelidega piire, siis mõõtmisel kasutatakse referentspindala, milleks on 10 m². Tulemuseks köögi ja elutoa õhumüra pidevuseks oli 61 dB. Tulemus vastab standardile.

Löögimüra korteri nr 13 ja nr 17 vahel uuriti ka vastupidiselt, et müraallikas asus korteris nr 13. Selle katsega sooviti teada, kas alumise korteri müra võib häirida ülemise korteri elanikke. Katse tulemustest selgus, et löögimüra oli 41 dB. Järeldada saab sellest, et I korrusel olevate inimeste käimine, laste jooksmine ja muu müra ei tohiks häirida ülemisi korteriomanikke.

Mõõtmise läbiviija kinnitas, et antud korterid olid ehitatud vastavalt müranõuetele ning mingeid muudatusi antud konstruktsioonis tegema ei pea.

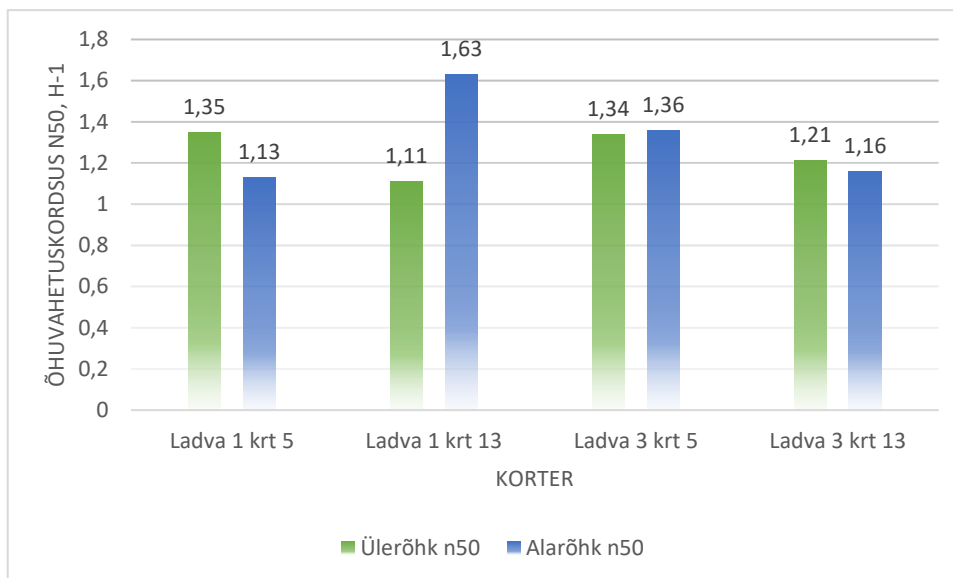
3.4 Piirete õhupidavuskatse tulemused

Nelja korteri keskmine õhulekke arv q_{50} alarõhu katse puhul oli $1,0 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ ja ülerõhu puhul $0,95 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$. Vastavalt normidele on soovitatav õhulekke arv alla $1 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$. Joonisel 47 on välja toodud kõigi nelja korteri õhulekke q_{50} väärtused.



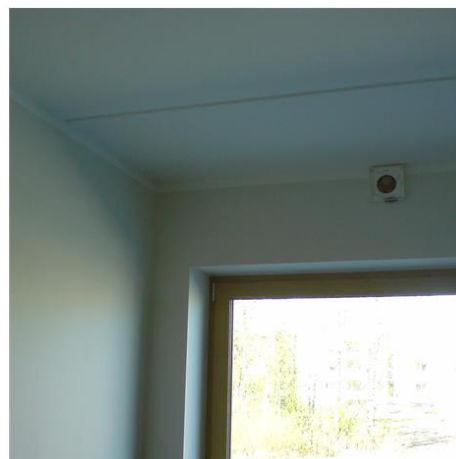
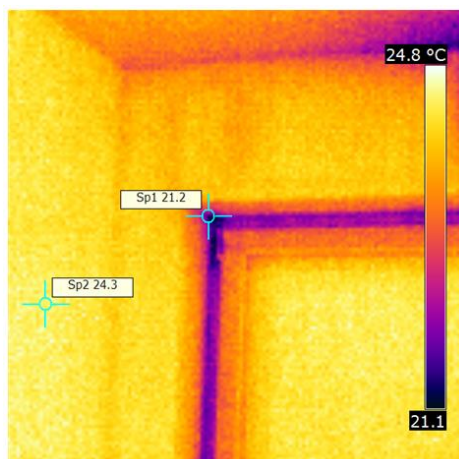
Joonis 47.Õhulekke arv q_{50} väärtused Ladva 1 ja Ladva 3 kortermajas.

Õhuvahetuskordsuse tulemused on toodud välja Joonisel 48.



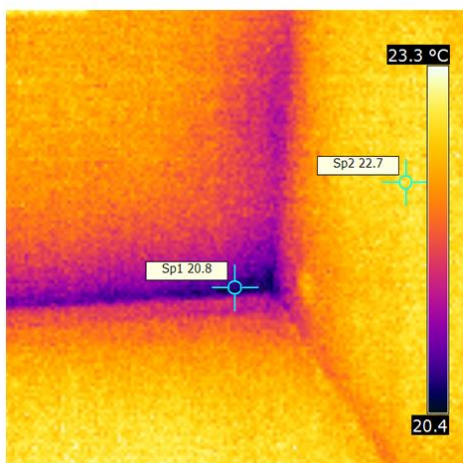
Joonis 48. Õhuvahetuskordsus n_{50} väärtused Ladva 1 ja Ladva 3 kortermajades.

Peamisteks õhulekke kohtadeks, mis avastati termografeerimisel, kui korteritesse oli tekitatud alarõhk, oli akna ülemised hinged ning mõni elemendi ühenduskoht betoonpinnaga. Õhulekked akna hingedes tuvastati termokaameraga ja käega katsudes, kus akna osast õhk läbi liikus. Joonisel 49 on välja toodud Ladva 1 korter nr 5 aknaraam, kus on näha õhu lekkimist läbi ülemise hinge.



Joonis 49. Ladva 1 krt. 5 õhuleke läbi akna hinge.

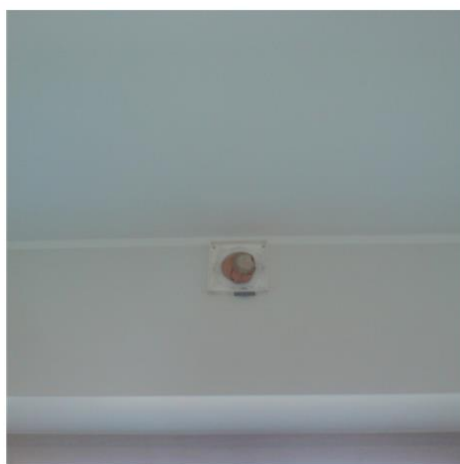
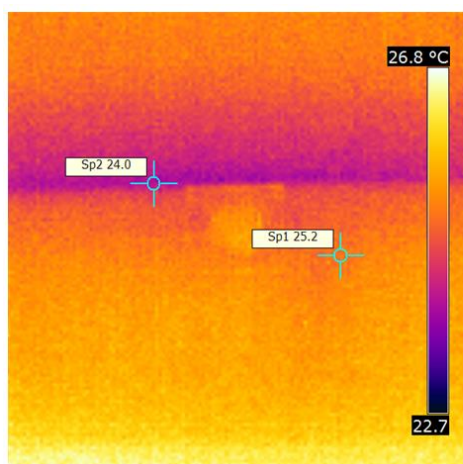
Betoonpinna ja elemendi ühenduskohad olid teostatud rahuldavalt. Joonisel 50 on välja toodud betooni ja elemendi ühendus, kus aurutõke on korralikult betoonpinnale liimitud, et tagada õhupidavus.



Joonis 50. Ladva 3 krt. nr 5 betoonpinna ja elemendi korrektne ühendus.

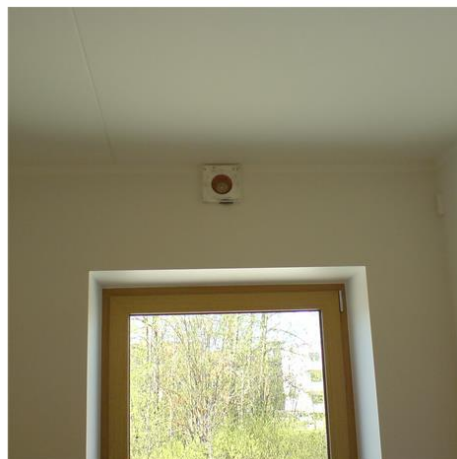
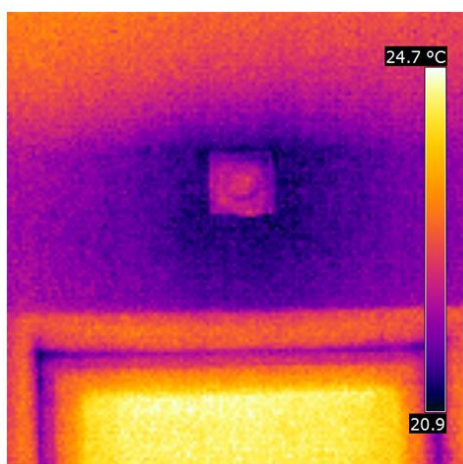
Jooniselt 50 on näha, et temperatuuride erinevus on kõigest ca 3°C, mis näitab, et ühendus on teostatud korrektselt ning õhu liikumine selles ühenduses on minimaalne.

Vahelae ja elemendi ühenduskohad olid samuti teostatud korrektselt. Termokaameraga pildistamisel selgus, et elementi tehtud vahelae „hammas“ oli korrektselt tihendatud ning paigalduse käigus ei olnud tihendusvill muljutud ega deformeerunud (Joonis 51).



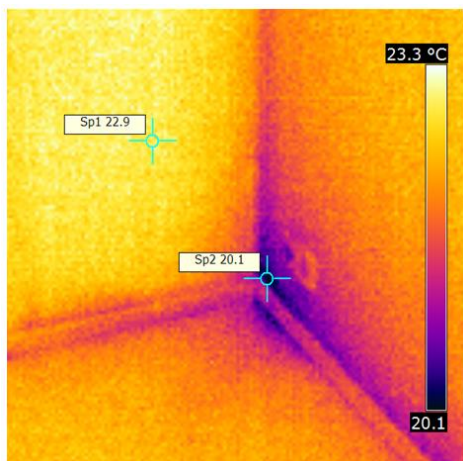
Joonis 51. Ladva 3 krt. 5 vahelae paneeli ja elemendi ühenduskoht.

Jooniselt 51 on näha, et *fresh*-ava on korrektselt enne katse algust suletud ning sealt ei lekkinud õhku. Leidus samuti Temperatuuride vahe seinaelemendi ja paneeli ühenduspunktis on ainult ca 1,5 °C võrra erinev. Esines ka üks koht, kus *fresh*-ava ümbruses oli õhuleke (Joonis 52). Selle põhjustas ebakorrapärane ava tihendamine. Kui *fresh*-ava lahti võeti, oli näha, et elemendi sisse paigaldatud toru ei olnud korrektselt tehtud õhutihedaks.



Joonis 52. Ladva 3 krt. 13 vahelae paneeli ja elemendi ühenduskoht.

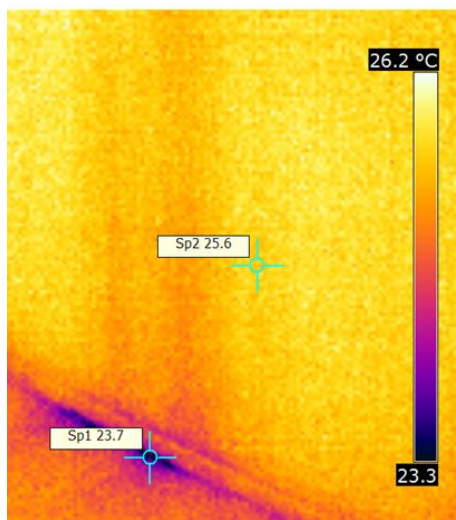
Ladva 1 ja Ladva 3 korterimajades mõlemas korteris nr 13 oli elementide ja olemasoleva seina ühenduskohad korrektselt teostatud ning suurt õhuliikumist ühendus kohtades ei esinenud. Joonisel 53 on näidatud õhuliikumine nurga ühenduses Ladva 3 kortermajas.



Joonis 53. Ladva 3 korter nr 13 õhuliikumine nurgaühenduskohas.

Elemendi ja kivi seina ühendusliitest on näha, et õhk liigub korterisse nurgast, mis võib olla tingitud samuti sokli soojustuse paigalduse kvaliteedist. Vaadates joonist, siis nurgaühendus seina ja paneeli vahel on ühtlase temperatuuriga, mis viitab sellele, et elemendi ja kivi ühendussõlm on õhutihe.

Elementide omavaheline liide on samuti õhupidav, kuid järjekordselt tuleb teatud määral õhku läbi sokli osa (Joonis 54).



Joonis 54. Ladva 1 korter nr 13 õhuliikumine elementide ühenduskohas.

Mõõtmiste tulemustest saab järeldada, et puitkarkasselemendid on õhutihedad ning nende paigaldamine ja ühendused on teostatud rahuldavalt. Ettepanekuna saab välja tuua, et järgmistel objektidel kontrollida kõik seinapaneeli lõigatud avad oleks tihendatud korrektselt, et ei tekiks soojakadusid.

KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli uurida puitkarkasselementidega soojustatud kortermajades kolme ehitusfüüsikalist parameetrit – sooja-, müra- ja õhupidavust. Magistritöös kirjeldati puitkarkasselementide projekteerimisest kuni seinapaneelide montaažini objektil. Töös viidi läbi kolme parameetri uurimiseks kolm erinevat katset, mille tulemusi analüüsiti ning tehti järeldusi.

Uuritavateks objektideks olid Tartus Ladva tänaval asuvad kortermajad nr 1 ja nr 3. Hoonete korterite vahelised kandvad seinad olid ehitatud Columbia-kivi õõnesplokist ning vahelaed betoonpaneelidest. Hoone välisfassaad oli soojustatud AS Welement'is projekteeritud ja toodetud puitkarkasselementidega. Kahe hoone soojustamiseks toodeti 118 seinapaneeli, mis paigaldati vertikaalselt kogu kahekorruselise hoone kõrguses. Keskmiselt oli elemendi pikkus ca 6 m ja laius ca 3 m. Paigaldus toimus tööjooniste alusel, mille olid koostanud AS Welement projekteerijad.

Magistritöö üheks uuritavaks ehitusfüüsikaliseks tunnuseks oli soojapidavus, mida uuriti termografeerimise ja temperatuurivälja tarkvara *THERM* abil. Termografeerimine teostati nii hoonest seest kui ka väljast. Välise termografeerimise tulemusena võis järeldada, et tehases elementidesse monteeritud aknad olid korrektselt tihendatud ja suuri õhulekkeid ei esinenud. Sisemise termografeerimise tulemuste põhjal võis väita, et seinapaneelide omavaheline ühendus oli teostatud korralikult. Keerulistes nurgaühenduse kohtades oli samuti suudetud tagada kvaliteetne ühendus. Temperatuuriindeksi arvutamine erinevates hoone osades kinnitas, et hoone seinapaneelide liitmisel ei ole ohtu kondenseerumiseks ja hallituse tekkeks. Kasutades tarkvara *THERM* modelleeriti Ladva kortermaja sokli-ja vahelaesõlm, et võrrelda pinnatemperatuure termografeerimisel saadud tulemustega. Lõpptulemusena erinesid termografeerimise tulemused tarkvara *THERM* tulemustega ainult paari kraadi võrra, mis kinnitab, et hoone oli projekteeritud ja seinapaneelid olid paigaldatud õigesti. Termografeerimise tulemustest saab üldiselt järeldada, et hoone soojustamine seinapaneelidega oli teostatud hästi. Soovitav oleks teostada korduv termografeerimine, et kontrollida eksploatatsioonis hoone erinevate konstruktsiooniosade ja nurga liitekohtade pinnatemperatuure.

Teine parameeter, mida töös käsitleti, oli piirdetarindite mürapidavus. Mõõtmisi teostas Akukon Oy Eesti filiaal. Tulemusi võrreldi kehtiva standardiga EVS 842: 2003 „Ehitiste heliisolatsiooninõuded“, millega võrdluses selgus, et hoone õhu- ja löögimüra olid normide piires. Vastavalt nõuetele peab korterite vaheline minimaalne õhumüra olema 55 dB ja löögimüra maksimaalne väärtus 52 dB. Katse tulemusteks saadi vastavad väärtused 57 dB ja 49 dB.

Viimaseks ehitusfüüsikaliseks tunnuseks uuriti piirete õhupidavust. Selle tulemuse saamiseks teostati nii ala- kui ülerõhutest ehk *BlowerDoor* katse. Katse viidi läbi mõlema maja kahes korteris. Esmalt tihendati korterites õhuavad ning seejärel tekitati korterisse alarõhk. Kontrollimatute ja planeerimatute õhulekete tuvastamiseks kasutati termokaamerat, millega pildistati pinnatemperatuure erinevates piirdetarindite liitekohtades. Nelja korteri keskmine õhulekkearv q_{50} alarõhutestis oli $1,0 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ ja ülerõhu puhul $0,95 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$. Õhuvahetuskordsus n_{50} oli alarõhukatsel keskmiselt $1,31 \text{ h}^{-1}$ ja ülerõhutesti puhul $1,25 \text{ h}^{-1}$. Katsete tulemustest selgus, et suuri õhulekkeid puitkonstruktsioonelementide omavahelistes liidetes ning seinapaneeli ja kivi- või betoonpinna ühenduskohtades ei esinenud.

Magistritöös saadud tulemusi on võimalik võrrelda sarnaste puitpaneelidega soojustatud hoonete ehitusfüüsikaliste parameetrite uurimisel. Samuti on võimalik hiljem katseid korrata, et uurida, kas liitekohtade õhu-ja soojapidavus on säilinud.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. AEROC plokkidest tarindilahenduste soojustehniline analüüs ja visualiseerimine. (2012). Uuringu lõpparuanne. Alev, Ü., Paap, L., Kalamees, T.
2. **Balaras, C. A., Droutsas, K., Dascalaki, E., Kontoyiannidis, S.** (2004). Deterioration of European apartment buildings. –*Energy and Buildings*. Vol 37, lk 515–527.
3. BlowerDoor. (s. a.). Minneapolis *BlowerDoor* overview. [on-line] <http://energyconservatory.com/wp-content/uploads/2017/08/All-Blower-Door-Guides.pdf> (28.04.2018).
4. Brüel&Kjaer. (s. a.) Sound level meter. [on-line] <https://www.bksv.com/en/products/sound-and-vibration-meters/sound-level-meters-and-vibration-meters/Type-2250-L> (27.04.2018).
5. Brüel&Kjaer. (s. a.) Free-field microphone. [on-line] <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/microphones/microphone-preamplifier-combinations/4189-A-021> (27.04.2018).
6. Brüel&Kjaer. (s. a.) Impact sound generator [on-line] <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/sound-sources/tapping-machine-3207> (27.04.2018).
7. Brüel&Kjaer. (s. a.) Sound calibrator [on-line] <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/calibrators/4231> (27.04.2018).
8. dBTechnologies. (s. a.) DVX D₁₀ HP [on-line] <http://www.dbtechnologies.com/en/products/dvx/dvx-d10-hp-p714.aspx> (27.04.2018).
9. Eesti eluasemefondi ehitustehniline seisukord-ajavahemikul 1990-2010 kasutusele võetud korterelamud. (2012). Uuringu aruanne. Kalamees, T., Ilomets, S., Liias, R., Raado, L-M., Kuusk, K., Maivel, M., R., Klõšeiko, P., Liho, E., Paap, L., Mikola, A., Seinre, E., Lill, I., Soekov, E., Paadam, K., Ojamäe, L., Kallavus, U., Mikli, L., Kõiv, A-T.
10. Eesti eluasemefondi puitkorterelamute ehitustehniline sisukord ning prognoositav eluiga. (2011). Uuringu lõpparuanne. Kalamees, T., Arumägi, E., Just, A., Kallavus, U., Mikli, L., Thalfeldt, M., Klõšeiko, P., Agasild, T., Liho, E., Haug, P., Tuurmann, K.,

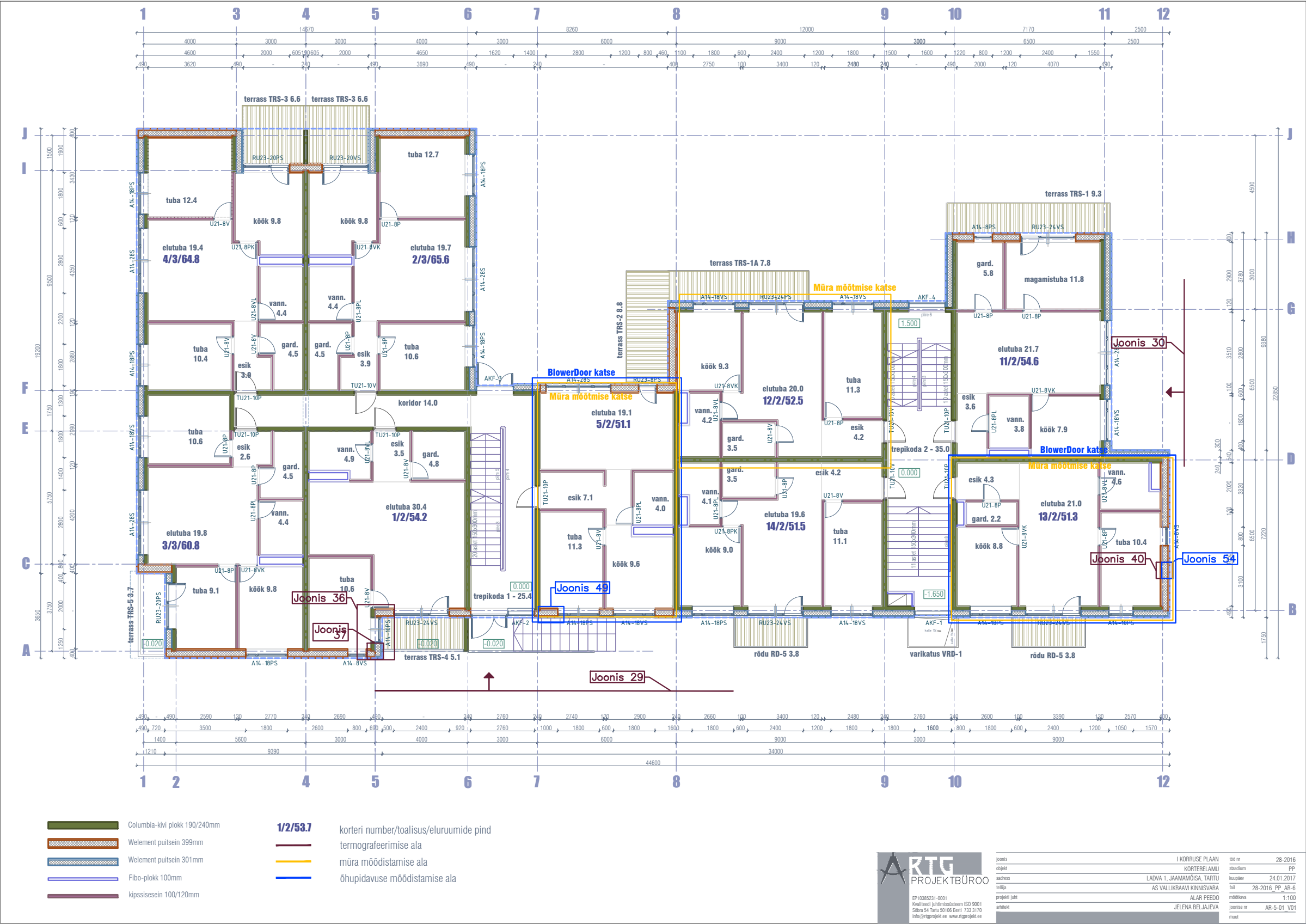
- Liias, R., Õiger, K., Langeproon, P., Orro, O., Välja, L., Suits, M., Kodi, G., Ilomets, S., Alev, Ü., Kurik, L.
11. Ehitisregister. (s. a.) Ehitisregister [on-line] <https://www.ehr.ee/app/otsing?3> (25.03.2018).
 12. EKVÜ. (s. a.) Eesti Kütte-Ventilatsiooniinseneride Ühendus [on-line] <http://www.ekvy.ee/et/> (07.04.2018).
 13. EVS 842:2003. Ehitiste heliisolatsiooninõuded. Kaitse müra eest. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
 14. EVS-EN ISO 9972:2015. Hoonete soojuslik toimivus. Hoonepiirete õhupidavuse määramine. Ventilaatoriga survestamise meetod. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
 15. Flir. (s. a.) Flir b50 infrared thermal imaging camera [on-line] <http://www.merlinlazer.com/b50-Infrared-Thermal-Imaging-Camera-2> (03.02.2018).
 16. Maa-amet. (s. a.) Maainfo kaardirakendus [on-line] https://xgis.maaamet.ee/maps/XGis?app_id=UU82A&user_id=at&LANG=1&WIDTH=460&HEIGHT=806&zlevel=10,661367.72,6474564.665 (26.03.2018).
 17. **Green, M., Taggart, J.** (2017). Tall wood bildings. Design, construction and performanc. Basel. lk 25-27, lk 52.
 18. Hoone energiatõhususe miinimumnõuded. (vastu võetud 03.06.2015, viimati jõustunud 01.07.2015). –*Riigi Teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/105062015015?leiaKehtiv> (05.03.2018).
 19. **Kalamees, T.** (2006a). Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia. –*Building and Environment*. Vol 42, lk 2369–2377
 20. **Kalamees, T.** (2006b). Critical values for the temperature factor to assess thermal bridges. – *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.* Vol 12, lk 218.229.
 21. **Kalamees, T.** (2008). Elamute õhulekkearvu baasväärtuse väljaselgitamine ja õhulekkearvu muul viisil tõendamise metoodika väljatöötamine. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.
 22. **Krüger, M.** (2011). Cultural Heritage Preservation. Berliin: Fraunhofer IRB Verlag. lk 101 2011.
 23. **Kuusk, K., Kurnitski, J., Kalamees, T.** (2017). Calculation and compliance procedures of thermal bridges in energy calculations in various European countries. - *Energy Procedia*. Vol 132, lk 27-32.
 24. **Masso, T.** (2012). Ehitusfüüsika ABC: soojus, niiskus, müra. Tallinn: Autor ja Ehitame kirjastus.

25. **Masso, T., Rohusaar, J., Mägi, R., Talvik, I., Jaaniso, V., Otsmaa, V., Voltri, V., Loorits, K., Peipman, T., Pukk, O., Hartšuk, V.** (2010). Ehituskonstruktori käsiraamat. Tallinn: Autorid ja EHITAME kirjastus. lk 114-178.
26. Müra normtasemed elu- ja puhkealal, elamutes ning ühiskasutusega hoonetes ja mürataseme mõõtmise meetodid. (vastu võetud 04.03.2002, viimati jõustunud 11.02.2017). –*Riigi Teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/163756?leiaKehtiv> (05.04.2018).
27. **Nõges, K.** (2017). TTÜ ehitab vana ühiselamu liginullenergiahooneks. – *Tallinna Tehnikaülikool*. <https://www.ttu.ee/ttu-ehitab-vana-uhiselamu-liginullenergiahooneks> (03.03.2018).
28. **Pihelo, P., Kalamees, T., Kuusk, K.** (2017). nZEB Renovation of Multi-Storey Building with Prefabricated Modular Panels. – *Energy Procedia*. Vol 132, lk 1006-1011.
29. PrefabAUS. (s. a.) What is prefab [on-line] <http://www.prefabaus.org.au/what-is-prefab/> (08.04.2018).
30. Puitmajaklaster (a). (s. a.) Puitmajade tootmisest Eestis [on-line] <http://woodhouse.ee/eesti-puitmajast/puitmaja-tehnoloogia-ja-olemus> (03.04.2018).
31. Puitmajaklaster (b). (s. a.) Tehasemaja eelised [on-line] <http://woodhouse.ee/eesti-puitmajast/tootmine/> (03.04.2018).
32. **Sandberga, K., Orskaug, T., Andersson, A.** (2016). Prefabricated wood elements for sustainable renovation of residential building facades. - *Energy Procedia*. Vol 96, lk 756– 767.
33. **Sniker, I.** (2018). Eestis on tõusuteel elamuehitus mitmekihilistest puitkonstruktsioonidest. –*Ehitus* (Äripäeva lisa), lk 54-55.
34. Soome Ehitusinseneride Liit RIL ry. (2009). Hoonete akustiline projekteerimine. Tallinn: ET-INFOkeskuse AS. lk. 25.
35. **Staib, G., Dörrhöfer, A., Rosenthal, M.** (2008). Components and systems. Modular construction- desing, structure, new technologies. München: Detail. lk 61.
36. Statistikaamet. (2016). Eesti Statistika aastaraamat 2016. Tallinn: Statistikaamet
37. Tervemaja OÜ. (s. a.) Alarõhutest [on-line] <https://www.tervemaja.ee/teenused/alarohutest/> (02.05.2018).
38. THERM. (s. a.) Two-Dimensional building heat-transfer modeling [on-line] <https://windows.lbl.gov/software/therm> (06.01.2018).

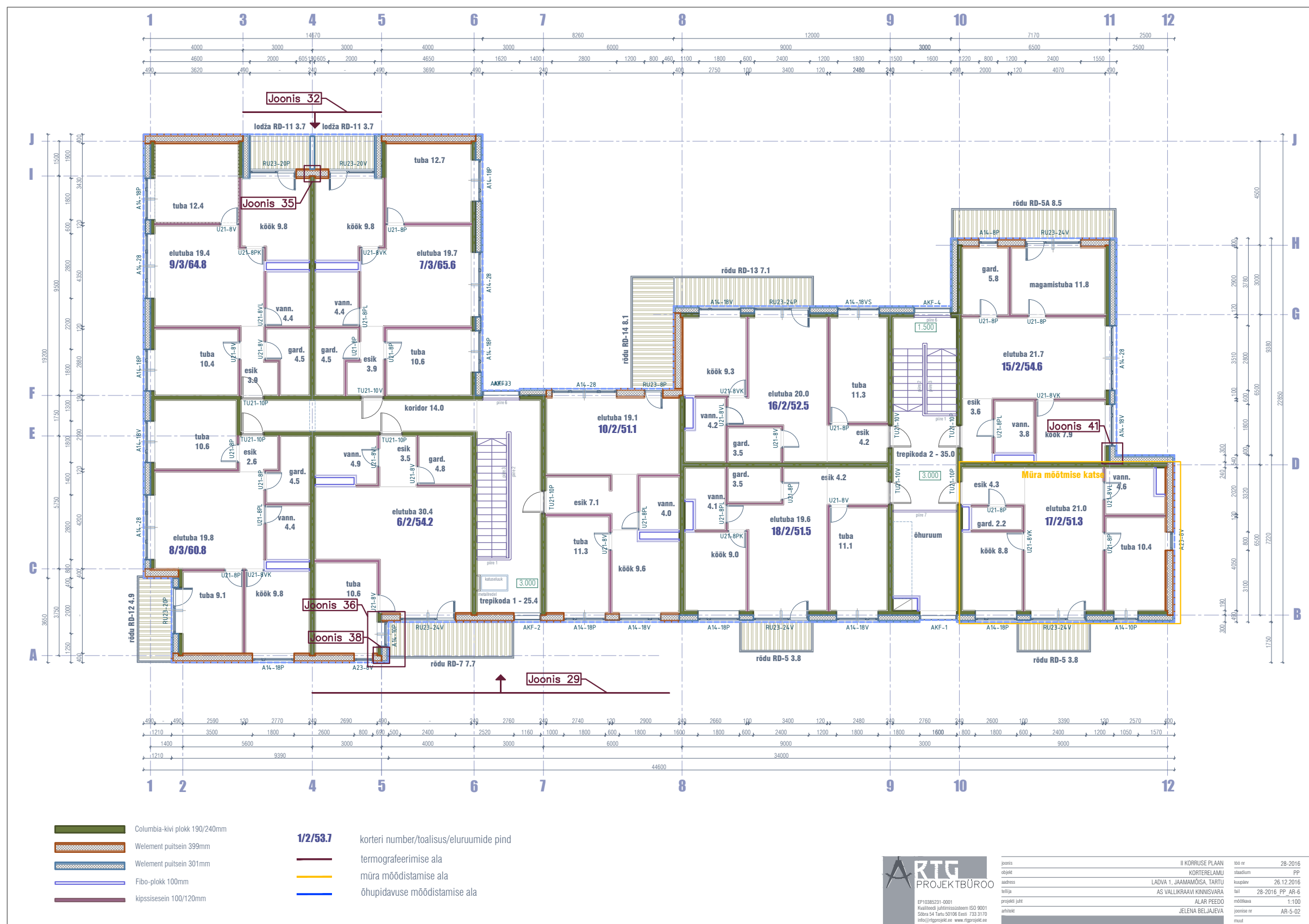
39. **Vinha, J., Manelius, E., Korpi, M., Salminen, K., Kurnitski, J., Kiviste, M., Laukkarinen, A.** (2015). Airtightness of residential buildings in Finland. –*Building and Environment*. Vol 93, lk128-140.
40. **Õiger, K., Kalamees, T., Kõiv, T-A., Liias, R., Kallavus, U., Mikli, L., Lehtla, A., Kodi, G., Luman, A., Arumägi, E., Mironova, J., Peetrimägi, L., Korpen, M., Männiste, L., Murman, P., Hamburg, A., Tali, M., Seinre, E.** (2009). Eesti eluasemefondi suurpaneel-korterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.

LISAD

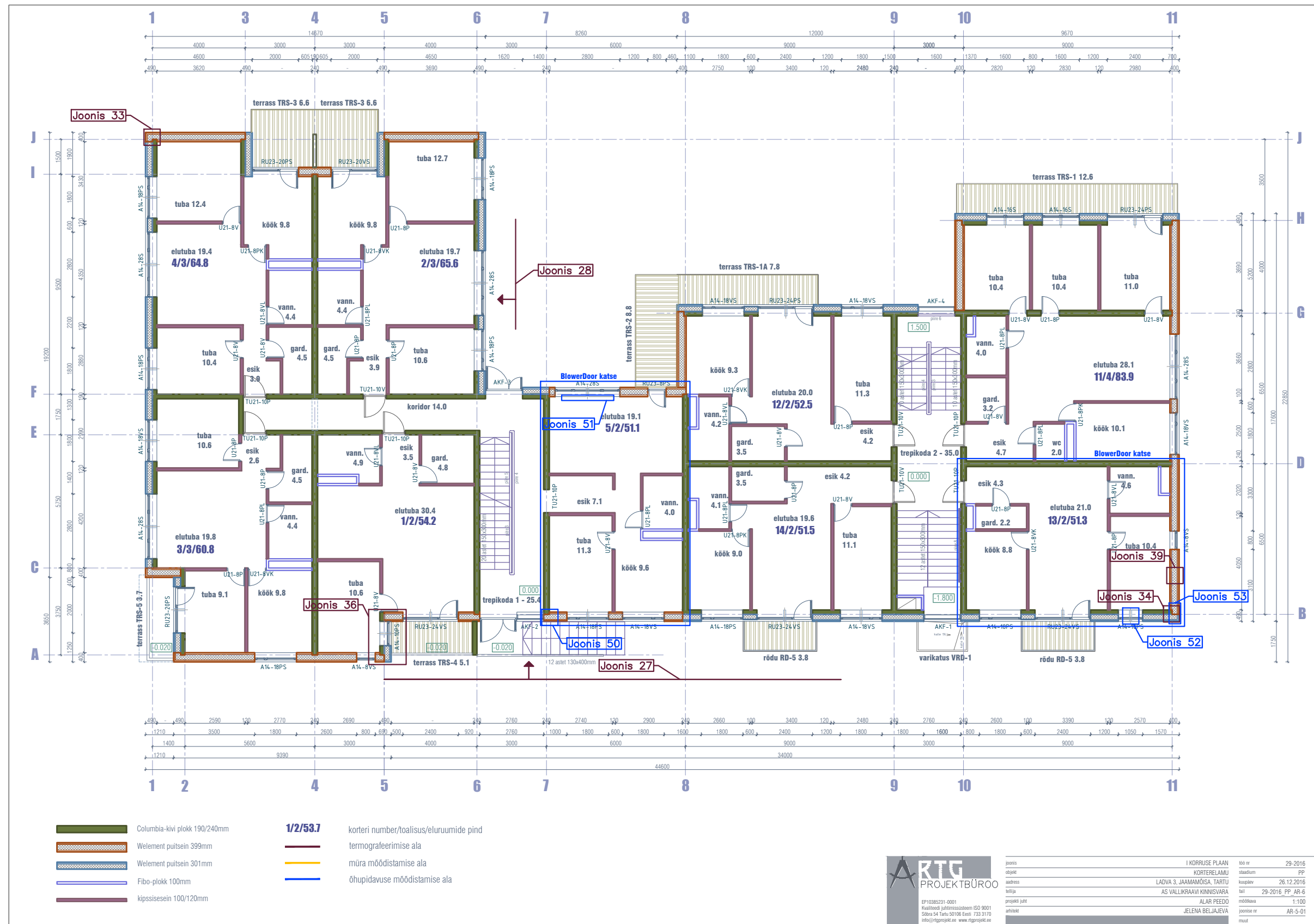
Lisa 1. Ladva 1 esimese korruse põhiplaan koos märkustega



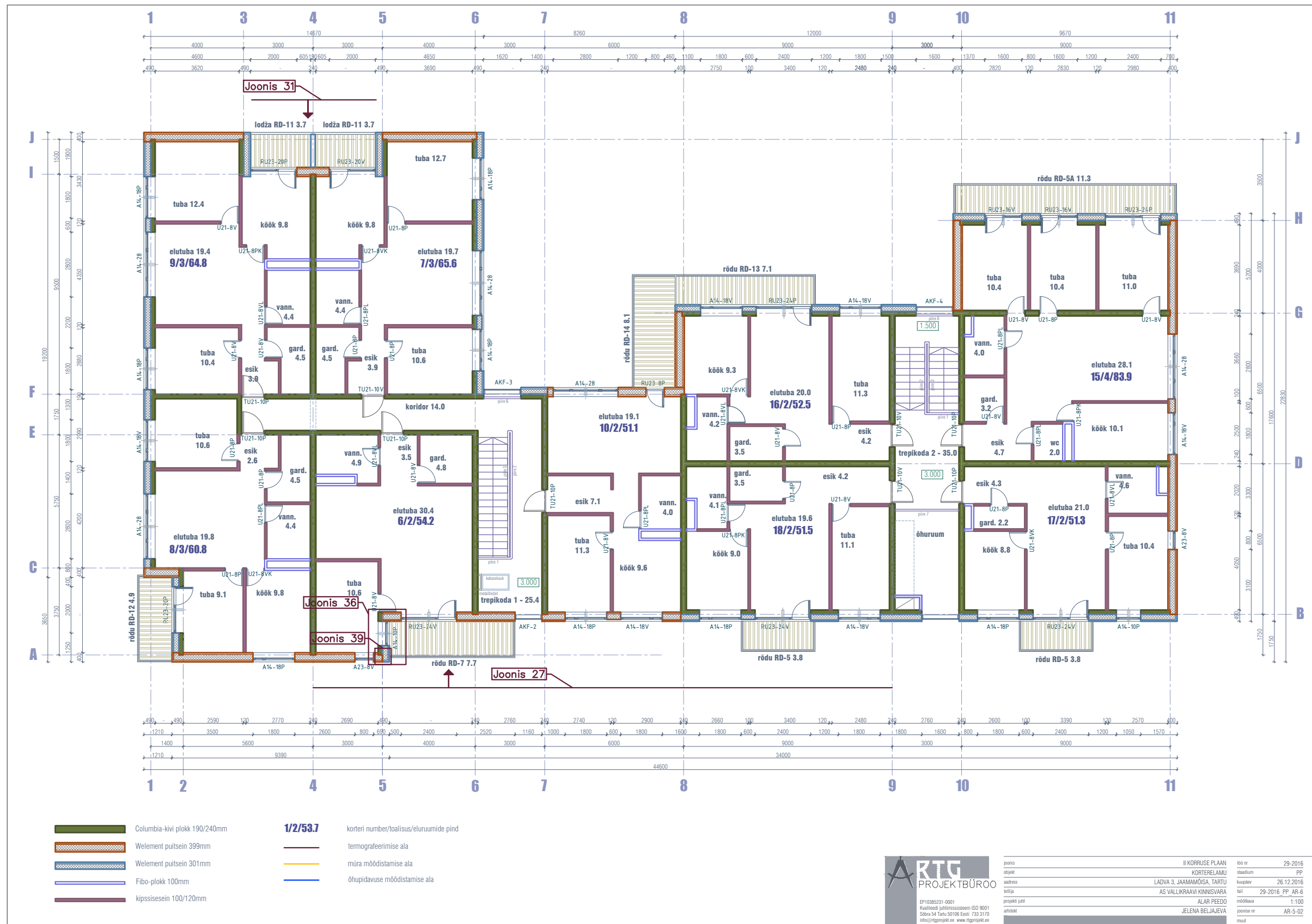
Lisa 2. Ladva 1 teise korruse põhiplaan koos märkustega



Lisa 3. Ladva 3 esimese korruse põhiplaan koos märkustega



Lisa 4. Ladva 3 teise korruse põhiplaan koos märkustega



Lisa 5. Ladva 1 kortermaja vaated

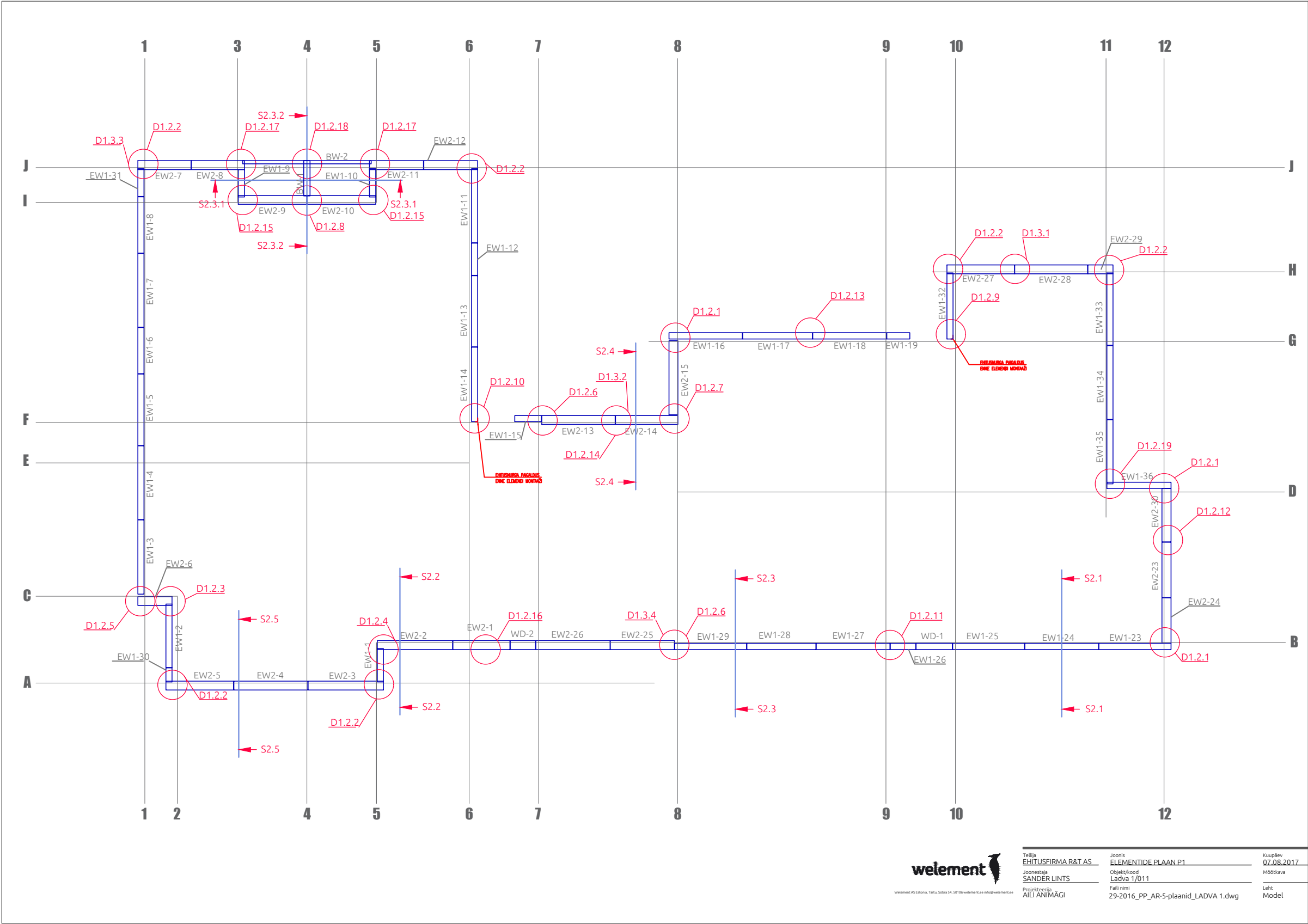




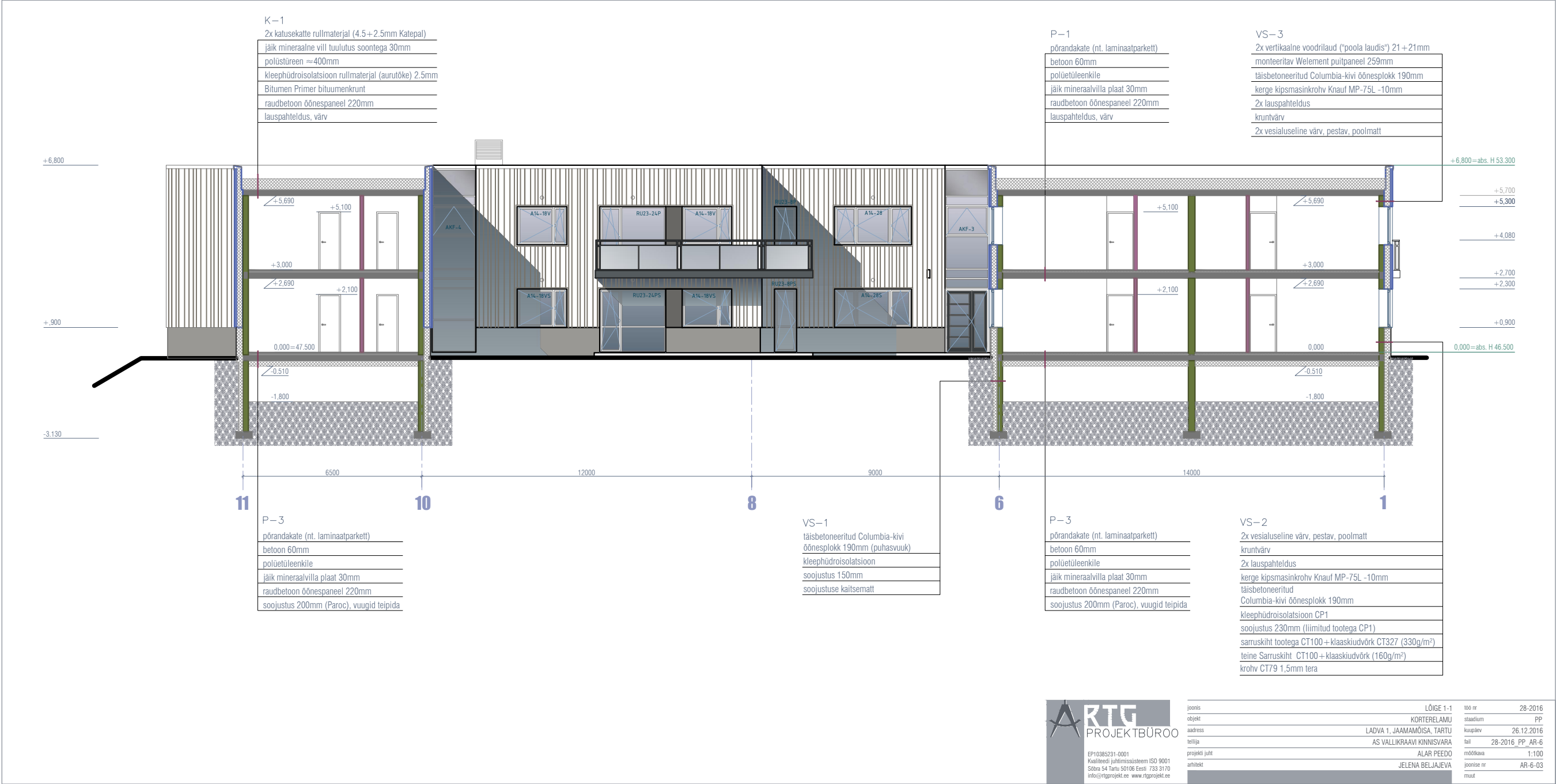
Lisa 6. Ladva 3 kortermaja vaated



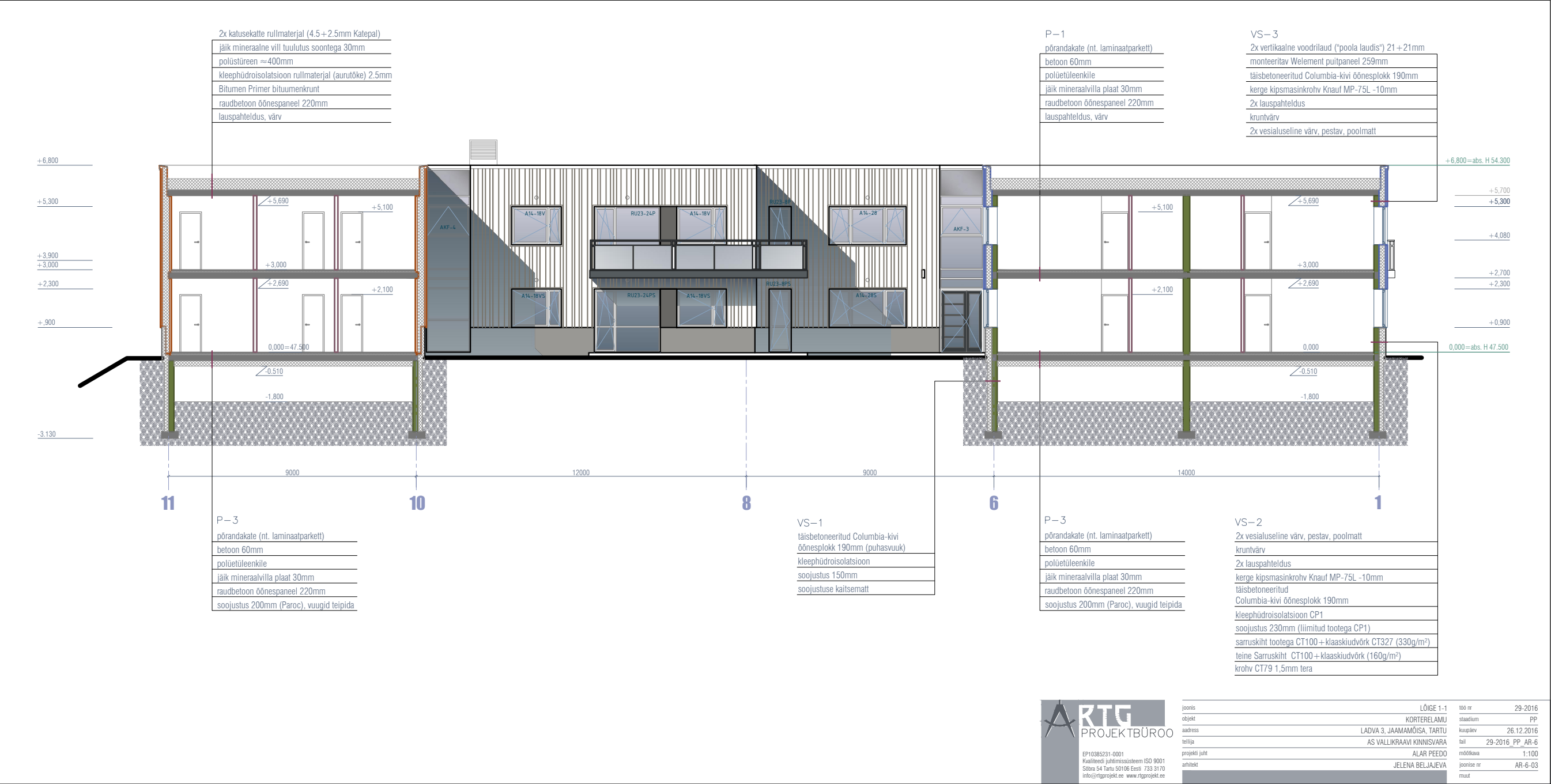
Lisa 7. Ladva 3 elementide jaotusplaan



Lisa 8. Ladva 1 kortermaja lõiked



Lisa 9. Ladva 3 kortermaja lõiked



Lisa 10. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Triinu Olm,
Sünniaeg 18.04.1992,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö
**Tasapinnaliste puitkarkasselementidega soojustatud kortermajade ehitusfüüsikaliste
parameetrite uurimine**

mille juhendaja on Marko Teder

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
- kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(allkiri)

Tartu, _____
(kuupäev)

Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta
Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)